

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



TESIS

**“METODOLOGÍA DE DISEÑO MODULAR PARA LA REDUCCIÓN DE
PARTES Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL EN UNA CAJA DE BATERÍAS DE
USO AUTOMOTRIZ”**

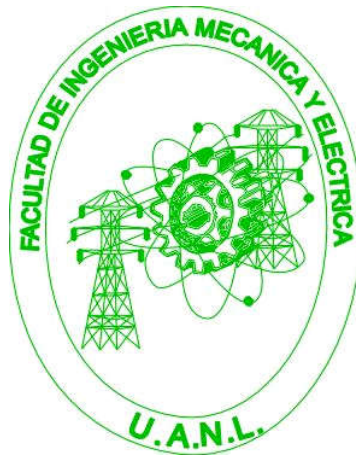
Por

Aurora Yamilet Hernández Hernández

**EN OPCIÓN PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

Abril, 2021

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



TESIS

**“METODOLOGÍA DE DISEÑO MODULAR PARA LA REDUCCIÓN DE
PARTES Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL EN UNA CAJA DE BATERÍAS DE
USO AUTOMOTRIZ”**

Por

Aurora Yamilet Hernández Hernández

**EN OPCIÓN PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA automotriz**

Abril, 2021



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis "Metodología de diseño modular para la reducción de partes y análisis estructural en una caja de baterías de uso automotriz", realizada por el alumno Aurora Yamilet Hernández Hernández, con número de matrícula 1612015, sea aceptada para su defensa como requisito para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz.

El Comité de Tesis

Dr. Oscar Jesús Zapata Hernández
Director

Dra. Adriana Salas Zamarripa
Co-Director

M.C. Enrique Ángel Garza Fernández
Revisor

Dra. Nelda Johana Gámez Treviño
Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

128

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, abril de 2021



Ciudad Universitaria Pedro de Alba s/n, C.P. 66455, A.P. 076 Suc. "F"
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. Tel: (81) 8332 0903 /
Comm.: 8329 4020 / Fax: (81) 8332 0904

Dedicatoria

Primeramente, a Dios por permitirme llegar a esta etapa de mi vida, por darme las fuerzas para seguir adelante, por la oportunidad que me da de culminar este proyecto, por poner en mí camino a grandes personas, las cuales estuvieron para apoyarme durante todo este proyecto. A mis padres que siempre han confiado en mí y me han apoyado siempre, enseñándome a tomar las mejores decisiones, por siempre motivarme a seguir adelante y ha no detenerme, a pesar de las dificultades, les agradezco todo lo que han hecho por mí y por demostrarme que se pueden cumplir nuestros anhelos y sueños cuando nos lo proponemos y sobre todo por ser un gran ejemplo en mi vida, a mis hermanos por ser parte de este sueño, por creer en mí, por motivarme y ser un gran apoyo.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por los recursos brindados durante el periodo de desarrollo de mi maestría.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León por el apoyo brindado en mis estudios de posgrado, así mismo agradezco a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica y en particular a la Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz.

Al Dr. Oscar Jesús Zapata Hernández por sus enseñanzas, conocimientos y dirección durante todo el desarrollo de este trabajo de investigación, por ser un gran ejemplo y por siempre motivarme a seguir adelante, por los consejos dados y por su confianza en mí.

A Dra. Adriana Salas Zamarripa por su ayuda para concebir este proyecto, las herramientas proporcionadas, así como el compartir su experiencia en el ámbito investigador.

A NAVISTAR por la confianza depositada en mi para desarrollar este proyecto de investigación por permitirme realizarme como profesionista, por toda la experiencia adquirida y por brindarme la oportunidad de contribuir en el desarrollo de productos nuevos.

A Dra. Nelda Johana Gámez, por ser parte de este proyecto, por su ayuda, por sus grandes consejos y por siempre motivarme a seguir adelante.

A mis amigos por su apoyo y ayuda en mi formación, personal, académica y profesional y finalmente a todas aquellas personas quienes con su granito de arena han ayudado a la realización de este trabajo.

Índice

Índice de figuras	8
Índice de Tablas	10
Resumen.....	11
Capítulo 1.....	12
1.1. Antecedentes.....	12
1.2. Problemática.....	13
1.3. Hipótesis	14
1.4. Objetivo General	14
1.4.1. Objetivos específicos	14
1.5. Justificación	14
Capítulo 2.....	15
2.1. Introducción	15
2.2. Diseño para Manufactura y Ensamblaje (DFMA).....	15
2.3. Diseño para Manufactura (DFM)	17
2.3.1. Pautas de diseño para manufactura (DFM).....	18
2.4. Diseño para ensamblaje	21
2.4.1. Características de diseño de ensamblaje (DFA)	23
Capítulo 3.....	25
3.1. Introducción.....	25
3.2. Metodología de diseño.....	25
3.3. Diseño modular.....	26
3.3.1. Ventajas y desventajas de un diseño modular.	29
3.4. Antecedentes de diseño modular	31
3.5. Metodologías para definir modularidad.....	34
3.5.1. Desarrollo de la función modular (MFD).....	35
3.5.2. Metodología DSM (Matriz de estructuras de diseño)	37
3.5.3. Metodología FAS.....	40

Capítulo 4.....	45
4.1. Introducción.....	45
4.2. Historia de método de elemento finito.....	45
4.3. Método de elemento finito (FEM)	47
4.4. Ecuaciones aplicadas en el método de elemento finito.	48
4.5. Análisis modal.....	57
Capítulo 5.....	60
5.1. Introducción.	60
5.2. Metodología de diseño modular.....	61
5.3. Diseño.....	65
5.4. Análisis de elemento finito.....	66
5.4.1. Preparación de geometrías.....	66
5.4.2. Joints.....	67
5.4.3. Mallado	67
5.4.4. Análisis estático	68
5.4.4.1. Condiciones de carga y frontera	68
5.4.4.2. Caso de gravedad.....	70
5.4.5. Análisis modal	71
Capítulo 6.....	72
6.1. Introducción	72
6.2. Análisis de bloques	72
6.3. Selección de Módulos.....	74
6.4. Diseños propuestos.	74
6.5. Análisis por elemento finito modelo original.....	76
6.6. Análisis por elemento finito modelo propuesto.....	79
6.7. Análisis modal.....	81
Capítulo 7.....	84
7.1. Conclusiones	84
7.2. Recomendaciones.	85
8. Referencias	86
Resumen Bibliográfico.....	95

Índice de figuras

Figura 2.1.Etapas de un estudio de ingeniería	16
Figura 2.2.Ejemplos de aplicación de la DFM	19
Figura 2.3.Algunas características de diseño que mejoran el montaje	22
Figura 3.1 Características modulares	29
Figura 3.2.Cuadro de Modularidad.	31
Figura 3.3.Sistema modular de Scania y posibles variantes de cabina.	31
Figura 3.4.La clasificación de un vehículo vista del concepto MQB.....	33
Figura 3.5.Paquetes de baterías modulares	34
Figura 3.6. Matrices de método MFD.....	35
Figura 3.7.Relaciones entre plataformas	38
Figura 3.8.Tipos de datos que se pueden representar y analizar con DSM	38
Figura 3.9.Representación Gráfica y Matricial de los datos dentro del DSM	39
Figura 3.10.Ejemplo de matriz binaria DSM y su grafo equivalente.....	39
Figura 3.11.Matriz DSM una vez realizado el agrupamiento	40
Figura 3.12.Eschema general de la metodología FAS	40
Figura 3.13.Comparativa DSM-FAS.	41
Figura 3.14.Tipos de Relaciones FAS	41
Figura 4.1.Numeración global de los nodos en el dominio	47
Figura 4.2.Técnica de discretización.....	48
Figura 4.3.Tipos de elementos finitos	49
Figura 4.4.Diagrama de cuerpo libre de un elemento de resorte lineal.....	53
Figura 4.5.Estado de esfuerzos en dos dimensiones	55
Figura 4.6.Estado de esfuerzos en tres dimensiones	56
Figura 4.7.Desplazamientos y rotaciones en un elemento en el plano x-y	56
Figura4.8.Sistema masa-resorte sometido a una fuerza	58
Figura 4.9.Diagrama de cuerpo libre de la masa de la Figura 4.8	58
Figura 5.1.Metodología, utilizada durante este proyecto de investigación.....	60
Figura 5.2.Análisis de cajas de baterías	61

Figura 5.3.Caja de baterías 30" explosionado.	62
Figura 5.4.Red de Relaciones de los elementos de la caja de baterías.	64
Figura 5.5. Red de relación dependencia de elementos.....	65
Figura 5.6.Modelo caja de baterías.....	65
Figura 5.7.Modelo caja de baterías con superficie.....	66
Figura 5.8.Conexiones de joints.....	67
Figura 5.9.Mallado modelo origina lineal cuadrático.	68
Figura 5.10.a) caso de carga con 4 baterías, b) caso de carga con 3 baterías. 69	
Figura 5.11.Condiciones frontera.....	69
Figura 5.12.Aceleración vertical.....	70
Figura 5.13.a) aceleración lateral, b) aceleración longitudinal.	71
Figura 5.14.ANSYS Modal.....	71
Figura 6.1. Bloque funcional de caja de baterías.	73
Figura 6.2.Bloque Ensamble caja de baterías.	74
Figura 6.3.Modelo propuesto 1:	74
Figura 6.4.Modelo propuesto 2:	75
Figura 6.5.Modelo propuesto 3:	75
Figura 6.6.Diseño propuesto.....	76
Figura 6.7.Diseño propuesto.....	76
Figura 6.8. Distribución de esfuerzos modelo original, aceleración vertical.	77
Figura 6.9.Distribucion de esfuerzos en canal de modelo original.....	77
Figura 6.10.Distribuccin de desplazamientos modelo original.	78
Figura 6.11.Distribución de esfuerzos de modelo propuesto	79
Figura 6.12.Distribucion de esfuerzos en componente rediseñado.	80
Figura 6.13.Distribuccin de desplazamientos modelo propuesto.....	81
Figura 6.14.Análisis modal modelo original.	82
Figura 6.15.Análisis modal modelo propuesto	82

Índice de Tablas

Tabla 3.1.Lista de controladores modulares	36
Tabla 4.1.Línea temporal de la evolución de los elementos finitos	46
Tabla 5.1.DSM Componentes Caja de baterías.....	62
Tabla 5.2.Tabla 5.2. DSM Caja de baterías.....	63
Tabla 5.3. Grado de centralidad.....	63
Tabla 5.4.Dependencia de los componentes.....	64
Tabla 5.5.Características de mallado.....	67
Tabla 6.1.DSM de Relaciones funcionales.	72
Tabla 6.2.DSM de relación de ensamblaje.	73
Tabla 6.3.Esfuerzos von Mises modelo original.....	77
Tabla 6.4. Factores de seguridad modelo original.	78
Tabla 6.5. Esfuerzos von Mises modelo propuesto.	79
Tabla 6.6.Factor de seguridad modelo propuesto.....	80
Tabla 6.7.Modos modelo original.....	81
Tabla 6.8.Modos modelo propuesto.....	82

Resumen

Actualmente la industria automotriz, existen factores clave a tomar en cuenta en el diseño de nuevos productos, los cuales son reducir costos y tiempos de producción, así como reducción de piezas. En la industria de camiones las múltiples plataformas de diseño existentes, el proceso de desarrollo de cajas de baterías con lleva a una gran variación de partes para cada modelo. En este trabajo de investigación se realizó un diseño modular para la reducción de partes de una caja de baterías, en la cual se platearon 5 etapas, la primer etapa fue el estudio de las diferentes cajas de baterías para poder seleccionar la caja con mayor volumen, una vez obtenida el modelo con mayor volumen, como segunda etapa se realizó el estudio de las metodologías de diseño modular, como tercer etapa se aplicó la metodología FAS a una caja de baterías de 30", para poder obtener una reducción de partes del diseño original, la cual demostró las relaciones que existen entre los distintos componentes y que funciona para encontrar los grupos que interactúan entre sí, para poder seleccionar los módulos, para la reducción de partes para este tipo de componentes, para diseñar y ensamblar diferentes propuestas de cajas de baterías como una cuarta etapa, para poder seleccionar la más apta, como quinta etapa fue evaluar el desempeño del modelo original después el modelo propuesto mediante un análisis de elemento finito y en base a los esfuerzos obtenidos, se realizó un análisis modal para conocer las frecuencias naturales en el programa ANSYS Mechanical. En el análisis estático resultó que el modelo propuesto obtuvo mejores resultados de esfuerzos a comparación del modelo original, se observó que ambos modelos cumplen con el factor de seguridad al no pasar el límite de cedencia, las frecuencias naturales obtenidas por el análisis modal cumplen para modelo original y propuesto ya que no aumenta un riesgo de vibraciones cuando entra en resonancia con los demás componentes.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

La industria automotriz enfrenta grandes desafíos, esto ha traído consigo formas cada vez más eficientes para enfrentarlos.

La mayor parte de las empresas han ido comprobando que el éxito a largo plazo no depende de un único producto, sino de una serie de artículos de alto valor que tengan como objetivo su introducción en mercados en expansión.

Debido al desarrollo de las tecnologías modernas y la globalización, la diferenciación de las empresas respecto a sus competidoras se ha convertido en un objetivo cada vez más difícil de conseguir. Para mantener la ventaja en el mercado, las empresas ofrecen variedad mediante la diferenciación de sus líneas de productos. Actualmente, bajo la competencia en mercados globalizados, muchas empresas están utilizando familias de productos para incrementar la variedad de la oferta, mejorar la satisfacción del cliente, acortar los plazos de entrega y reducir costos [1]. Los expertos de la industria crean sus productos en función no sólo de la estética, sino del desempeño. Es por ello por lo que buscan crear productos óptimos, es decir, que ofrezcan la máxima funcionalidad, comodidad, seguridad, eficiencia y desempeño.

Hoy en día la producción de componentes es una parte muy importante en la industria automotriz, por tal motivo la industria alcanzará su máximo rendimiento mediante la implementación de estrategias de manufactura [2].

Los sistemas de desarrollo de producto carecen de metodologías básicas aplicadas al diseño conceptual modular, la propuesta sustentada permite la compatibilidad en el desarrollo entre los diferentes sistemas que integran el producto en una misma plataforma de productos.

Las ventajas que representa están basadas en las necesidades de ofrecer un mejor producto con sistemas aprobados y validados y con una reducción importante de costos en el desarrollo y manufactura.

En los últimos años, el uso de paquetes de simulación especializados en la optimización de formas se ha ampliado de manera exponencial, esto se debe a la precisión del diseño, así como una considerable reducción en el tiempo que el diseñador invierte en la obtención de geometrías óptimas, ya que este depende de la experiencia del diseñador y en la mayoría de las ocasiones el procedimiento de diseño se basa en una metodología de prueba y error.

1.2. Problemática

La empresa NAVISTAR es una ensambladora de camiones y la clasificación de los vehículos de carga, se hace en base la relación al peso que pueden transportar. Debido a esta clasificación, actualmente la empresa al realizar la instalación de cajas de baterías cuenta con diferentes configuraciones y diferentes números de partes.

En la actualidad existen diferentes tipos de cajas de batería, las cuales tienen diferentes configuraciones y debido a esto existe diferentes variaciones para un mismo componente, por lo cual se desea aplicar una metodología de diseño modular para poder generar una reducción de partes en una caja de batería y realizar una simulación que sirva como validación para el estudio y obtención de información de manera que se pueda explicar en qué condiciones se puede trabajar mediante la metodología aplicada.

1.3. Hipótesis

Es posible obtener una reducción de partes en una caja de baterías, utilizando una metodología de diseño modular y poder generar una simulación para obtener una mejor confiabilidad del producto.

1.4. Objetivo General

Analizar una caja de baterías, con una metodología de diseño modular, para generar una reducción de partes sobre el modelo seleccionado, la cual pueda adaptarse y soportar las cargas de los diferentes diseños de camiones.

1.4.1. Objetivos específicos

- Realizar un estudio de los diferentes tipos de diseños de los modelos actuales de las cajas de baterías, para conocer las diferentes partes que existe en cada una de ellas.
- Estudiar y aplicar una metodología diseño modular para la de reducción de partes.
- Proponer un diseño en base a la reducción de partes del modelo original.
- Evaluar el modelo de caja de baterías original y propuesta mediante un análisis, con el método de solución de elemento finito.
- Realizar comparación del modelo original y modelo propuesto.

1.5. Justificación

NAVISTAR está en un proceso constante de innovación, y a su vez de renovación de los productos que actualmente ofrece, considerando este comportamiento de la industria. La estrategia Navistar 4.0 establece aumentar la aplicación del diseño modular. Los resultados de esta investigación podrán resolver problemas a las exigencias del mercado y se alinea con la tendencia de desarrollo de producto de la compañía, a través de la generación de un ahorro en costo de producción, por medio de la eliminación de números de parte.

Capítulo 2

Diseño para Manufactura y Ensamblaje

2.1. Introducción

En este capítulo se presentará el concepto diseño para manufactura y ensamblaje (DFMA por sus siglas en inglés), se mencionan los pasos y los objetivos al utilizar esta metodología. Se describen las pautas de diseño para manufactura (DFM por sus siglas en inglés) y las características de diseño para ensamblaje (DFA por sus siglas en inglés).

2.2. Diseño para Manufactura y Ensamblaje (DFMA)

DFMA es un proceso analítico que considera todos los aspectos del diseño, el desarrollo, las partes totales, la fabricación, el costo, el tiempo de ensamblaje y la modularidad. El DFMA ha sido utilizado por la industria durante varios años.

El diseño del producto es el primer paso en la fabricación y es donde se toman las decisiones críticas que afectarán la forma y el costo final del producto. El diseño del producto tiene un impacto en más del 70 % del costo total del producto. Los conceptos de manufactura y ensamblaje pueden mejorar enormemente los costos de producción y desarrollo, a la vez que mejoran la confiabilidad y la calidad.

El diseño para la fabricación y el ensamblaje se concentra en la simplificación de los diseños mientras que también se evalúan las mejoras del ensamblaje para optimizar aún más el diseño general para la fabricación y la calidad [3].

La DFMA es un procedimiento sistemático que tiene por objetivo ayudar a las empresas a aprovechar al máximo los procesos de fabricación que existen y a mantener al mínimo el número de piezas de un conjunto. Lo consigue permitiendo el análisis de las ideas de diseño. No es un sistema de diseño, y cualquier innovación debe provenir del equipo de diseño, pero proporciona una cuantificación para ayudar a la toma de decisiones en las primeras etapas del diseño [4].

La figura 2.1 resume los pasos que se han dado al utilizar la DFMA durante el diseño. En primer lugar, se realiza el análisis del diseño para el ensamblaje (DFA), que conduce a una simplificación de la estructura del producto. Después, se obtienen estimaciones tempranas de los costos de las piezas tanto para el diseño original como para el nuevo diseño a fin de tomar decisiones de compensación.

Durante ese proceso, se consideran los mejores materiales y procesos a utilizar para las distintas piezas. Una vez que se han seleccionado finalmente los materiales y procesos, se puede llevar a cabo un análisis más exhaustivo del diseño para manufactura (DFM) para el diseño de detalle de las piezas [4].

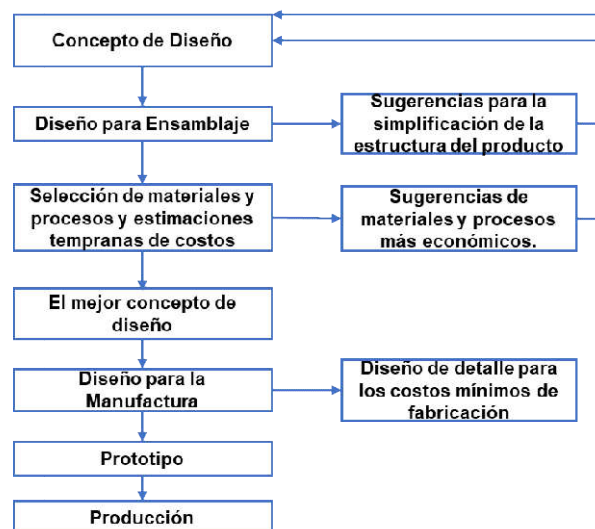


Figura2.1.Etapas de un estudio de ingeniería simultánea con el uso de la DFMA [4].

Los principales objetivos asociados con el uso de la metodología de la DFMA se basan en:

- El beneficio es el objetivo principal.
- Eliminación de ajustes innecesarios.
- Minimizar las reorientaciones durante la fabricación y el montaje.
- Mejoras en la calidad del diseño final.
- Minimizar el número de piezas.
- Maximizar el trabajo en equipo y la toma de decisiones por consenso.
- Diseño para un servicio fácil.
- Mejorar las condiciones de ergonomía para los operarios.
- Un buen diseño manual podría llevar a un proceso de ensamblaje parcial o totalmente automatizado.

2.3. Diseño para Manufactura (DFM)

La manufactura debe ser competitiva, es decir, el costo laboral unitario debe mantenerse y la producción debe ser de la alta calidad que los consumidores desean. La producción debe llegar al mercado mundial de manera oportuna. Es exigente darse cuenta de que los productos de mala calidad pueden dar lugar a la pérdida de prestigio nacional y que la marca asociada a la producción de productos de baja calidad no es fácil ni barato de superar. Para producir productos innovadores de alta calidad también es necesario evitar el estancamiento intelectual y la pérdida de creatividad [5].

DFM es una metodología cuyo propósito es facilitar el proceso de fabricación, busca simplificar el diseño del nuevo producto mediante la reducción de componentes. Resultando por consecuencia una disminución en el número de horas de ingeniería de diseño necesarias y una reducción de partes comerciales o materia prima a comprarse beneficiando el volumen de los inventarios. Para la correcta aplicación de esta metodología se deben seguir los siguientes cinco pasos [6]:

- Determinar la facilidad de fabricación del producto y compararla con otros productos con las mismas características que hubiera en el mercado.

- Fijar los objetivos que se pretenden obtener del producto a desarrollar; costo, calidad, flexibilidad, riesgo, tiempo de lanzamiento, eficiencia y efectos ambientales.
- Definir los parámetros de evaluación e ideas de diseño.
- Generar una serie de propuestas conceptuales del producto.

2.3.1. Pautas de diseño para manufactura (DFM)

Las pautas del DFM son declaraciones de buenas prácticas de diseño que se han derivado empíricamente de años de experiencia. El uso de estos principios ayuda a reducir la variedad de posibilidades, de modo que la cantidad de detalles que debe considerarse está dentro de la capacidad del diseñador [7].

1. Minimizar el número total de piezas: Eliminar las partes resulta en un gran ahorro. Una pieza es un buen candidato para la eliminación si no hay necesidad de movimiento relativo, no hay necesidad de ajustes posteriores entre las piezas, y no hay necesidad de que los materiales sean diferentes.

Sin embargo, la reducción de una pieza no debe ir tan lejos como para añadir costos porque las piezas restantes se vuelven demasiado pesadas o complejas.

La mejor manera de eliminar piezas es hacer que el número mínimo de piezas sea un requisito del diseño en la etapa conceptual del mismo. La combinación de dos o más partes en una arquitectura de diseño integral es otro enfoque. Las piezas de plástico son particularmente adecuadas para el diseño integral. Los sujetadores son a menudo los principales objetivos para la reducción de piezas. Otra ventaja de fabricar piezas de plástico es la oportunidad de utilizar encajes a presión en lugar de tornillos, figura 2.2.

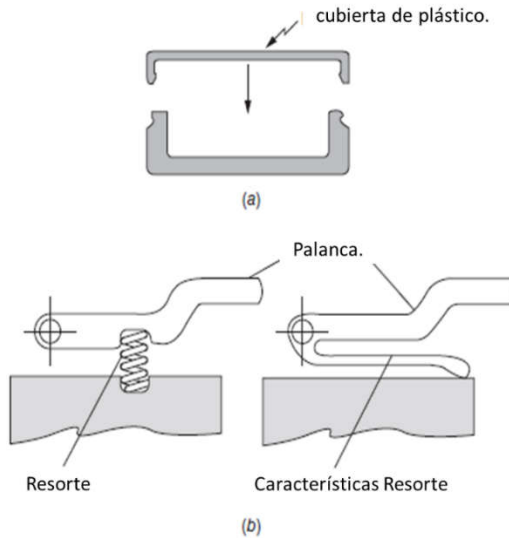


Figura 2.2. Ejemplos de aplicación de la DFM [7].

2. Estandarizar los componentes: Los costos se reducen al mínimo y la calidad mejora cuando se utilizan en el diseño componentes estándar disponibles en el mercado. Los beneficios también se producen cuando una empresa estandariza un número mínimo de diseños de piezas (tamaños, materiales, procesos) que se producen internamente en sus empresas. Es posible que la vida útil y la fiabilidad de los componentes estándar ya se hayan establecido, por lo que la reducción de los costos se logra mediante descuentos por cantidad, la eliminación del esfuerzo de diseño, la evitación de los costos de equipo y herramientas, y un mejor control de las existencias.

3. Utilizar piezas comunes en todas las líneas de productos: Es de buen sentido comercial utilizar piezas en más de un producto. Especifica los mismos materiales, piezas y subconjuntos en cada producto en la medida de lo posible. Esto proporciona economías de escala que reducen el costo unitario y simplifican la capacitación de los operadores y el control de los procesos. Los sistemas de gestión de datos de productos (PDM) pueden utilizarse para facilitar la recuperación de diseños similares. La figura 2.2. muestra un ejemplo de aplicaciones DFM.

4. Estandarizar las características de diseño: Estandarizar las características de diseño como los tamaños de los agujeros perforados, los tipos de rosca de los tornillos y los radios de curvatura minimiza el número de herramientas que deben mantenerse en el cuarto de herramientas. Esto reduce los gastos generales de fabricación. Una excepción es la producción de alto volumen donde las herramientas especiales pueden ser más rentables. Espaciar los agujeros en las piezas mecanizadas, fundidas, moldeadas o estampadas, para que se puedan hacer en una sola operación sin debilidad de herramientas. Hay un límite en cuanto a la cercanía de los agujeros debido a la resistencia en la delgada sección entre los agujeros.

5. Mantener los diseños funcionales y simples: Lograr la funcionalidad es fundamental, pero no especificar más rendimiento del necesario. Cuando se añaden características al diseño de un componente, se debe tener una razón firme para la necesidad. El producto con menos piezas, las formas menos intrincadas, los menos ajustes de precisión y el menor número de pasos de fabricación será el menos costoso de fabricar. Además, el diseño más simple será normalmente el más fiable y el más fácil de mantener.

6. Diseñar las piezas para que sean multifuncionales: Una buena manera de minimizar el número de piezas es diseñar de tal manera que las piezas puedan cumplir más de una función, lo que conduce a una arquitectura integral. Por ejemplo, una pieza puede servir como miembro estructural y como resorte. La pieza podría diseñarse para proporcionar una característica de guía, alineación o auto fijación en el ensamblaje.

7. Diseñar las piezas para facilitar su fabricación: El material menos costoso que satisfaga los requisitos funcionales debe ser elegido. Dado que el mecanizado para dar forma tiende a ser costoso, siempre que sea posible se prefieren los procesos de fabricación que producen la pieza hasta alcanzar una forma casi final, a fin de eliminar o reducir al mínimo el mecanizado.

8. Evitar tolerancias excesivamente estrictas: Las tolerancias deben establecerse con mucho cuidado. Si se especifican tolerancias más estrictas de lo necesario, se incrementan los costos. Esto se debe a la necesidad de operaciones de acabado secundarias como el rectificado, el bruñido y en la peado, al coste de incorporar una precisión adicional en las herramientas, a los ciclos de funcionamiento más largos.

9. Reducir al mínimo las operaciones secundarias y de acabado: Minimizar las operaciones secundarias como el tratamiento térmico, el mecanizado y la unión y evitar las operaciones de acabado como el desbarbado, la pintura, el chapado y el pulido. Usar sólo cuando haya una razón funcional o de seguridad para hacerlo. Mecanizar una superficie sólo cuando la funcionalidad lo requiera o si es necesario para fines estéticos.

10. Utilizar las características especiales de los procesos: Alerta a las características especiales de diseño que muchos procesos proporcionan. Por ejemplo, los polímeros moldeados pueden ser provistos de color "incorporado", en contraposición a los metales que necesitan ser pintados o laminado. Las extrusiones de aluminio se pueden hacer en secciones transversales intrincadas que luego se pueden cortar a longitudes cortas para proporcionar piezas. Las piezas de metal en polvo pueden hacerse con una porosidad controlada que proporciona cojinetes auto lubricantes.

2.4. Diseño para ensamblaje

El proceso de ensamblaje consiste en dos operaciones, la manipulación, que implica agarrar, orientar y posicionar, seguida de la inserción con la unión. Hay tres tipos de ensamblaje, clasificados por el nivel de automatización. En el ensamblaje manual, el ensamblaje automático y el ensamblaje robótico.

El costo del ensamblaje se determina por el número de piezas y la facilidad con que se pueden manipular, insertar y sujetar las piezas. El diseño puede tener una fuerte influencia en ambas áreas.

La reducción del número de piezas puede lograrse mediante la eliminación de piezas (por ejemplo, sustituyendo los tornillos y las arandelas por encajes a presión, y combinando varias piezas en un solo componente). La facilidad de manipulación e inserción se logra diseñando de manera que las piezas no se enreden ni se aniden unas con otras, y diseñando, teniendo en cuenta la simetría. Las piezas que no requieren una orientación de extremo a extremo antes de la inserción, como lo hace un tornillo, deben utilizarse si es posible. Las partes con simetría rotacional completa alrededor del eje de inserción, como una arandela, son las mejores. Cuando se utiliza la manipulación automática es mejor hacer una pieza altamente asimétrica si no se puede hacer simétrica.

Para facilitar la inserción, una pieza debe hacerse con chaflanes o rebajes para facilitar la alineación, y las holguras deben ser generosas para reducir la resistencia al montaje. Las características de auto ubicación son importantes, así como proporcionar una visión sin obstrucciones y espacio para el acceso de la mano. La figura 2.3 muestra algunos de estos puntos [7].

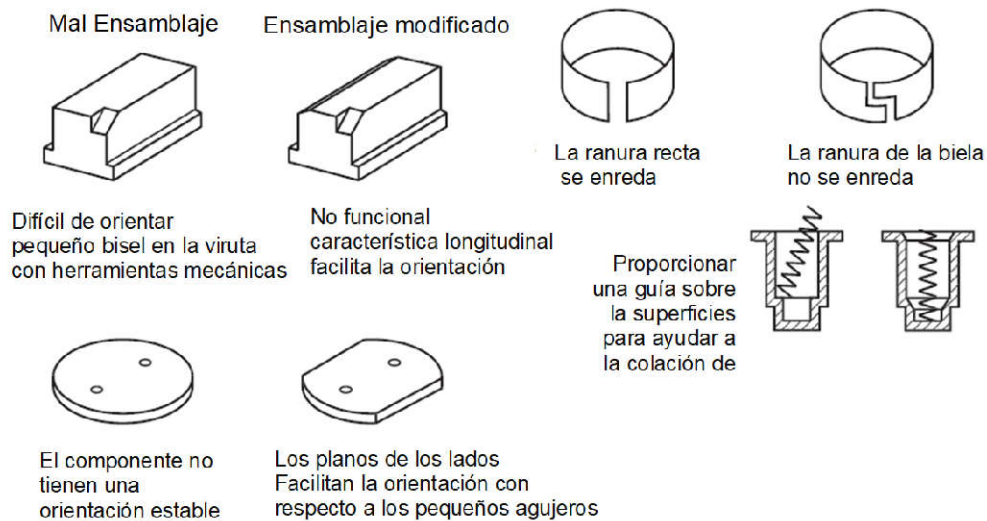


Figura2.3.Algunas características de diseño que mejoran el montaje [7].

2.4.1. Características de diseño de ensamblaje (DFA)

Los lineamientos del diseño para el ensamblaje se pueden agrupar en tres clases: general, manejo e inserción

Lineamientos generales:

1. Minimizar el número total de partes: Una parte que no es requerida por el diseño es una pieza que no necesita ser ensamblada. Revisar la lista de piezas e identificar las partes que son esenciales para el buen funcionamiento del producto. Los criterios para una parte esencial, también llamada parte teórica, son:

- La parte debe exhibir el movimiento relativo a otra parte que se declara esencial.
- Hay una razón fundamental para que la pieza esté hecha de un material diferente al resto de las piezas.
- No sería posible ensamblar o desensamblar las otras partes a menos que esta parte esté separada, es decir, que sea una conexión esencial entre las partes.
- El mantenimiento del producto puede requerir el desmontaje y la sustitución de una pieza.
- Las piezas que se utilizan únicamente para sujetar o conectar otras piezas son las principales candidatas para su eliminación.

Los diseños pueden evaluarse para la eficiencia del ensamblaje con la ecuación 2.1, donde el tiempo necesario para ensamblar una pieza teórica se toma como 3 segundos.

$$\text{Diseño deficiencia del ensamble} = \frac{(3)(\text{número mínimo teórico de par})}{\text{Tiempo total de ensamblaje de todas las partes}} \quad (2.1)$$

Una parte teórica es la que no puede ser eliminada del diseño porque es necesaria para la funcionalidad. Los primeros diseños típicos tienen eficiencias de montaje del 5 al 10 %, mientras que después del análisis del DFA es típicamente del 20 al 30%.

2. Minimizar las superficies de ensamblaje: Simplificar el diseño de manera que se necesiten menos superficies para preparar el ensamblaje, y que todo el trabajo en una superficie se complete antes de pasar a la siguiente.

Lineamientos para el manejo:

3. Evitar los cierres separados o minimizar los costos de estos: Los sujetadores pueden representar sólo el 5 % del costo de material de un producto, pero la mano de obra que requieren para el manejo adecuado en el montaje puede llegar al 75 % de los costos de montaje. El uso de tornillos en el ensamblaje es costoso. Se deben utilizar los ajustes a presión siempre que sea posible.

4. Minimizar la manipulación en el ensamblaje: Las piezas deben ser diseñadas para que la posición requerida para la inserción o unión sea obvia y fácil de lograr. La orientación puede ser asistida por características de diseño que ayuden a guiar y localizar las piezas en la posición adecuada. Las piezas que van a ser manipuladas por los robots deben tener una superficie superior lisa para las pinzas de vacío, o un agujero interior para el arpón

Capítulo 3

Metodología de diseño

3.1. Introducción

En este capítulo se presentará el concepto de metodología de diseño, se mencionarán los diferentes enfoques para definir la modularidad por algunos autores, se hablará de las ventajas que se tiene al trabajar sobre la modularidad y cuáles son las metodologías de diseño modular para poder desarrollar un producto modular.

3.2. Metodología de diseño

La metodología del diseño ha sido una constante en la búsqueda de soluciones a través de la experiencia acumulada en el diseño de producto, [8]. Esta es utilizada para buscar soluciones, las cuales pueden ser encontradas mediante diferentes métodos. Todas las metodologías permiten explorar la mente creativa del diseñador.

Debido a la gran importancia del diseño, se han desarrollado en los últimos años diferentes metodologías de diseño para tratar de optimizar etapas de proyectos. Una definición de lo que es una metodología de diseño puede ser:

La metodología de diseño se entiende como una serie de acciones concretas para el diseño de sistemas técnicos que derivan su conocimiento de ciencia del diseño y psicología cognitiva. Incluye planes de acciones que vinculan los pasos de trabajo y las fases de diseño según el contenido y la organización. Estos planes deben de ser adaptados de manera flexible a la tarea específica que se está realizando. También incluyen estrategias, reglas y principios para alcanzar objetivos generales y específicos [9].

3.3. Diseño modular

Existen diferentes enfoques para definir la modularidad módulo es un bloque constructivo de un sistema más grande que tiene una función específica y unas interrelaciones bien definidas, a través de interfaces [10].

En ingeniería, se entiende como modularidad la descomposición de un producto/servicio en módulos, siendo dichos módulos unidades o bloques que realizan por sí mismo una o varias funciones del producto/servicio, interconectándose con los demás mediante interfaces [11].

La complejidad de un producto está relacionada con el número de elementos diferentes, la naturaleza de la interdependencia de estos y la forma en que interactuarán [12]. Utilizando un diseño modular se reduce dicha complejidad simplificando productos, que en otros casos sería un sistema de interconexiones inmanejables, en subsistemas más pequeños e independientes que funcionan como un todo.

El diseño modular se lleva a cabo en la fase de diseño, pero resulta en todas las fases del ciclo de vida del producto. La manera en que un producto es dividido en módulos tiene un gran efecto en su montaje, desmontaje y servicio [13].

Los índices sobre modularidad pueden ser usados para obtener información relevante acerca del grado de elementos comunes en una familia de productos.

Existe literatura especializada sobre el tema de modularización, se describe y revisa en detalle a las estrategias de plataforma y modularización. En la industria automotriz predomina una definición de modularidad basada en el punto de vista del montaje. Sin embargo, se dispone de poco sobre cómo aplicar estos enfoques en la industria, como tal los enfoques se perciben comúnmente como ventajas competitivas.

En la literatura, el término sistema modular se utiliza en diferentes aplicaciones. Por esta razón, hay muchos términos y definiciones, así como numerosos sinónimos que reflejan los mismos o similares hechos. Además del término construcción modular, también existen términos como tecnología modular, sistema modular, tecnología de combinación, principio modular, construcción modular, producción modular, sistema y construcción modulares. También hay numerosas definiciones y categorías de sistemas modulares y bloques de construcción. Esta variedad de términos es un reflejo de las numerosas posibilidades de aplicación de los sistemas modulares [14].

Nasytis, A. define la construcción modular como un proceso para la producción de diferentes objetos compuestos a partir de la reserva de elementos para poder formar un gran número de complejos con un pequeño número constante de elementos diferentes. La forma opuesta de descomponer diferentes objetos de tal manera que se creen el menor número posible de elementos diferentes es un verdadero proceso de estandarización [15].

Kohlhase, N. en su investigación optimiza los sistemas modulares en cuanto a su función y montaje y los evalúa económicamente, formula la siguiente definición: Un sistema modular consiste en una serie de módulos que se seleccionan para aplicaciones específicas y se combinan entre sí teniendo en cuenta la compatibilidad para configurar productos modulares en un área de aplicación limitada. Este método de construcción se llama diseño modular. Los bloques de construcción como objetos de un sistema modular (por ejemplo, máquinas, ensamblajes o piezas individuales) configuran productos modulares. Tienen un diseño estandarizado y propiedades materiales, están coordinados, son concretos o abstractos y pueden consistir en bloques de construcción (menos complejos). Los productos modulares están hechos de bloques de construcción y tienen un propósito diferente. Se denominan variantes de productos o variantes de oferta si forman parte de una gama de productos y se ofrecen a la venta [14].

Piller, F. y Warniger, D. definen un módulo en su trabajo de investigación para la industria como una unidad lista para ser instalada que puede ser separada de los aspectos de ensamblaje y cuyos componentes están físicamente conectados entre sí [16].

Según Firchau, N. y Franke, H. uno de los principales objetivos de la construcción modular es la realización de los módulos como partes repetidas, estándar o comunes de las familias de partes. El desarrollo de un sistema modular requiere un considerable trabajo preliminar, que sólo vale la pena si se hace un uso suficiente de las variantes previstas en una fecha posterior [17].

Ehrlenspiel, K. entiende que un sistema modular es un sistema de combinación de componentes y ensamblajes para crear productos con diferentes funciones generales. Es también la diferencia con la serie, donde la función del producto es siempre la misma [10].

Salvador, F. compara las características mencionadas de los productos modulares con su propia definición. Según esta definición, un producto es modular si sus componentes o módulos pueden separarse del producto global y pueden combinarse entre sí. Si bien la confiabilidad representa directamente una de las características de los productos modulares que ha determinado, relaciona las demás características con su definición. Por lo tanto, el desacoplamiento de las características de los módulos es un requisito previo para la necesaria separabilidad de un módulo. Al mismo tiempo, un débil acoplamiento de los módulos para permitir la combinación de los módulos. La figura 3.1 muestra y resume las características de las estructuras de productos modulares [18].

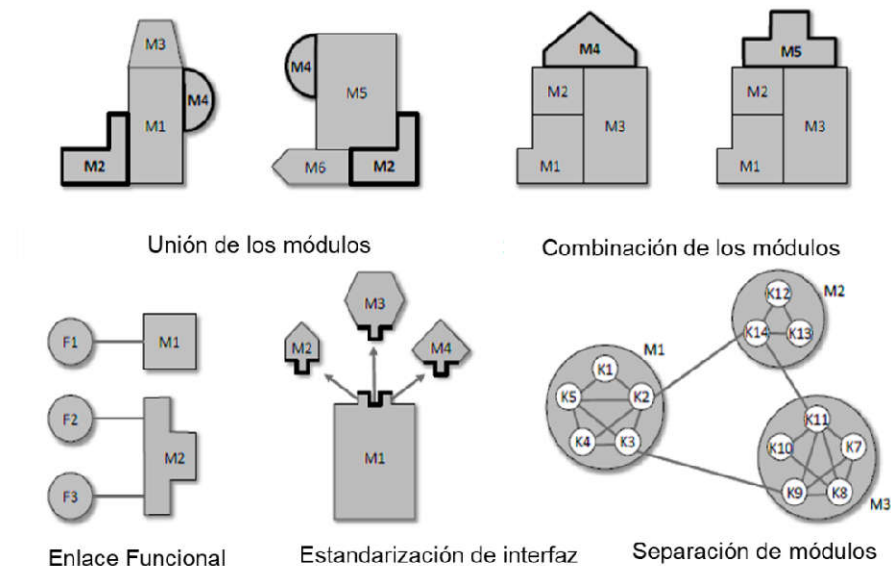


Figura3.1 Características modulares (F: Función, K: Componente, M: Módulo) [18].

El Diseño Modular se refiere a aquellos sistemas que están previstos, desde la fase de concepto, ser diseñados para utilizarlos en distintos productos, plataformas o arquitectura [19]. Deben cumplir con las funciones para las cuales fue concebido y con las especificaciones para cada uno de sus usos. Las relaciones entre el resto de los sistemas se estrechan debido a que comparten en alto grado de información y funciones [20].

Este tipo de sistemas son más complejos desde el punto de vista de diseño, ya que deben cumplir especificaciones, posición y validación con cada uno de los productos para los cuales han sido diseñados [21]. Debido a esto, los distintos actores, desde una fase inicial de concepto, deben tener claro las necesidades y requerimientos.

3.3.1. Ventajas y desventajas de un diseño modular.

La modularidad, junto con el enfoque de plataforma, tiene una serie de ventajas, entre las que cabe mencionar:

- Mediante el uso del mismo módulo en múltiples productos se puede obtener una gran variedad de productos.
- Los multisistemas modulares proporcionan ventajas tales como requerimientos de capital reducidos.

- Los módulos son de gran ayuda en el diseño para reutilización, ya que si están diseñados con interrelaciones bien definidas pueden ser reutilizados en otros diseños.
- La modularidad al final del ciclo de vida de un producto favorece el desensamblado y el reciclado de este.
- La modularidad hace a un producto más flexible frente a los posibles cambios.
- Entre los inconvenientes de la modularidad se considera:
 - a) La modularidad puede conducir a un costo excesivo debido al sobre diseño y la ejecución ineficiente, y demasiados módulos comunes pueden producir una pérdida de la identidad de marca.
 - b) Los productos mecánicos de elevada potencia, en contraposición a los productos de electrónicos, se verían beneficiados por un diseño integral, si el objetivo es la mejor ejecución técnica.

Esto se debe a que un diseño modular es con mucha probabilidad, pero no necesariamente, más grande, pesado y energéticamente menos eficiente que un producto que posee arquitectura integral. Además, estos efectos son difíciles de controlar para los ingenieros de diseño [22].

La ventaja radica en que el proceso de diseño, aunque es más complejo en dicho tipo de sistemas, se reduce considerablemente (llegando a valores nulos) cuando este sistema es empleado en otras variantes dentro de la plataforma. Es así como los módulos son necesarios hoy en día para abaratar costos de diseño y producción, y ser competitivos en el precio al cliente final, lo que resultará en mayores ganancias para la compañía [23].

Para comenzar a analizar los sistemas modulares, se debe definir y cuantificar el grado de modularidad en cada nivel, comenzando por el nivel inferior o componente [24]. Se determina a través de la función y se define el módulo en base a la falta de conectividad entre ellos, con un análisis de propagación, compartición y puentes existentes de la Figura 3.2.

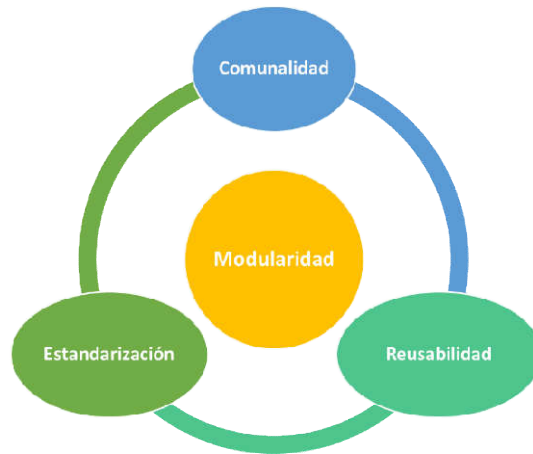


Figura3.2.Cuadro de Modularidad [24].

3.4. Antecedentes de diseño modular

En el 2010, Piller, F. y Kumar, A. en su trabajo de investigación utilizaron un enfoque modular de manera consistente. Para cada componente, un grado limitado de flexibilidad predefinido. El sistema modular de producción desarrollado posibilitó la fabricación de modelos específicos para cada cliente a partir de un mismo número de componentes. Con el sistema modular, se facilitó la configuración de un camión para que ofrecieran la mayor eficiencia como se muestra en la figura 3.3 [25].

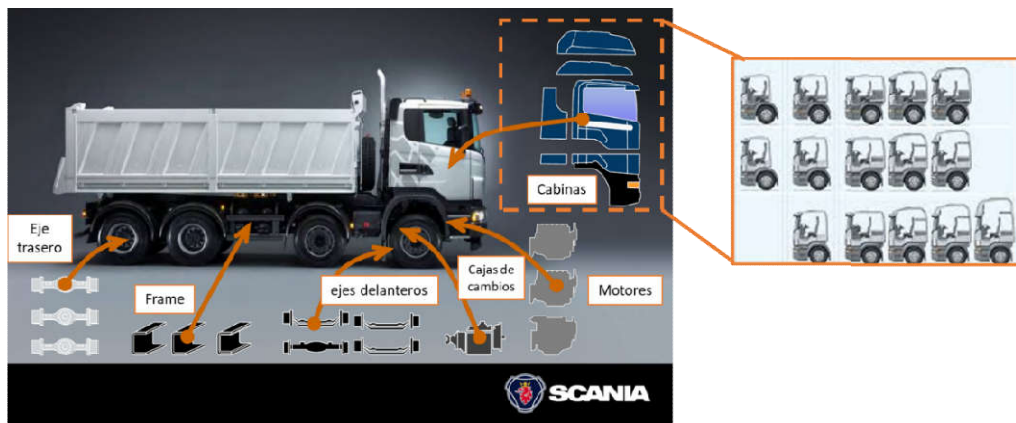


Figura3.3.Sistema modular de Scania y posibles variantes de cabina [25].

Esto permitió series de producción considerablemente más largas que las que eran posibles con un sistema de productos convencionales. El camión se fabricó a partir de un número de módulos básicos que pudieran combinarse en una variedad de formas para crear la solución de transporte óptima.

Una cantidad limitada de componentes, se pueden realizar un gran número de configuraciones combinando motor, tipo de cabina, chasis, ejes, transmisión, etc. Pudiéndose realizar alrededor de 1,400,000 combinaciones [26].

En el 2017 Weidemann, U. Tomo como ejemplo a Volkswagen AG, quien desarrolló el diseño de una carrocería modular para dominar la complejidad. Con la introducción del kit modular transversal (MQB) y longitudinal (MLB), el grupo Volkswagen abrió nuevos caminos en la producción de vehículos [28].

Los dos kits de construcción se utilizaron para subdividir partes de la carrocería del vehículo en módulos, se combinaron entre sí, lo que permitió el uso múltiple de un módulo más allá de un proyecto de vehículo. De este modo, los módulos pueden modificarse en sí mismos sobre la base de interfaces definidas sin que ello afecte a los componentes adyacentes.

Para hacerlo posible, se analizaron con antelación varios vehículos del segmento A (VW Polo, Golf, Touran, Tiguan) y del segmento B (VW Passat) y se identificaron los posibles efectos de sinergia. Resultó que los vehículos tenían anchos similares, pero diferían fundamentalmente en longitud. Por lo tanto, se hicieron cortes tanto horizontales como verticales en la arquitectura, de manera que se puede distinguir entre la parte delantera y trasera del vehículo, así como entre una subestructura uniforme y sobre un diseño específico. La figura 3.4 muestra los cortes en la estructura de la carrocería del vehículo [28].



Figura3.4.La clasificación de un vehículo vista del concepto MQB [28].

El 2019 el fabricante de camiones eléctricos alemán E-Force One dio a conocer que equiparía sus vehículos con las baterías de iones de litio modulares del fabricante suizo Ecovolta. Los camiones eléctricos comenzaron a ser una de las soluciones preferidas por las empresas para el transporte de mercancías en el interior de las ciudades y a nivel regional.

Para poder atender a las necesidades de sus clientes, en un sector en el que los requerimientos pueden ser muy diferentes, E-ForceOne ha desarrollado una estrategia para modificar de forma individual cada vehículo según el tipo de ruta que realiza, la distancia que debe recorrer y la tecnología de carga a la que puede acceder.

Cada semirremolque puede equiparse con diferentes tamaños de batería y diferentes motores eléctricos en función del perfil de viaje que realice. De esta forma, los componentes individuales se ensamblan en un pack singular para cada vehículo. Estos viajes, repetidos a diario, permiten optimizar las transmisiones y las baterías.

Para optimizar sus productos los fabricantes necesitan recurrir a soluciones de paquetes de baterías modulares, de forma que su nivel de estandarización sea compatible como se muestra en la figura 3.5 con un desarrollo y producción eficiente del producto [30].



Figura3.5.Paquetes de baterías modulares [31].

3.5. Metodologías para definir modularidad.

Existen diferentes metodologías para desarrollar productos modulares. Algunas carecen de un punto de vista integrado entre el producto y su fabricación [32], otras se enfocan más en el campo de negocio con diferentes variedades de producto [33].

Varios autores han tratado de clasificar los métodos para modularizar un sistema. Por ejemplo, en la referencia [34] se clasificaron los métodos en cinco categorías distintas:

1. Métodos de agrupamiento.
2. Métodos de separación con gráficos y matrices.
3. Métodos de programación matemática.
4. Métodos de inteligencia artificial.
5. Algoritmos genéticos y heurísticos.

Para modularizar un sistema el método más tradicional es descomponerlo en módulos más pequeños basados en funciones, donde los módulos individuales realizan funciones específicas requeridas por el sistema en general [35].

3.5.1. Desarrollo de la función modular (MFD)

El desarrollo de la función modular (MFD por sus siglas en inglés) [36], utiliza tres matrices interconectadas, como se muestra en la figura 3.6, para describir los requisitos del cliente, las propiedades del producto y las estrategias de la empresa.

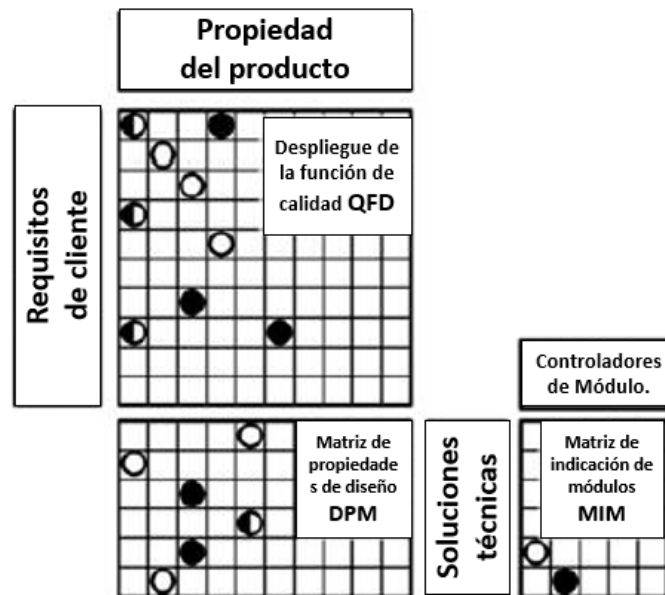


Figura 3.6. Matrices de método MFD [36].

- Matriz de implementación de funciones de calidad producto (QFD por sus siglas en inglés): Es la relación entre los requisitos del cliente y las propiedades del producto [37].
- Matriz de propiedades de diseño (DPM por sus siglas en inglés): Relaciona las propiedades producto con las soluciones técnicas.
- Matriz de indicación de módulos (MIM por sus siglas en inglés) captura la intención estratégica de cada solución técnica o componente. La intención estratégica es específica de la empresa, lo que implica que no existe una sola solución. Este método establece 12 razones para modular que se indican en la tabla 1.

Razones para modularizar		
Desarrollo y diseño de producto	Reutilizable	Se espera que no cambie en el futuro y puede reutilizar en futuras generaciones.
	Evolución tecnológica	El empuje tecnológico significa que es probable que una parte o un subsistema pase por un cambio tecnológico durante su ciclo de vida porque las demandas de los clientes cambiarán radicalmente.
	Planificación de productos	Cuando una pieza es portadora de características específicas, la planificación del producto podría indicar un cambio en un momento determinado.
Variación	Especificación técnica	Las variaciones en las especificaciones técnicas deben acomodarse en una o unas pocas partes para evitar que las variaciones se extiendan por todo el producto.
	Estilo	Algunos productos están fuertemente influenciados por las tendencias y la moda mientras que otros tienen partes) que están fuertemente conectadas a una marca o un logotipo.
Producción	Unión comunion	Es posible encontrar piezas y funciones que pueden ser unidades de unión utilizadas en todo el surtido de productos.
	Proceso y/o Organización	Para hacer que el proceso de producción sea lo más eficiente posible, las partes del producto que tiene el mismo proceso de producción se intentan unir.
Calidad	Prueba de funciones por separado	Si cada módulo puede ser probado antes de ser suministrado al flujo principal, se puede suministrar a los operadores una retroalimentación inmediata sobre la calidad, lo que resulta en un aumento de la calidad debido principalmente a la pronta alimentación.
Compras	El proveedor ofrece una caja negra	La modularidad hace posible la compra de módulos completos y estándar (ingeniería de la caja negra) en lugar de partes individuales. Esto reduce la cantidad de trabajo de compra. La modularidad también reduce el costo de los materiales porque se necesitan menos piezas para construir el surtido.
Postventa	Servicio y mantenimiento	El servicio rápido y el mantenimiento son un factor importante para muchas empresas. Los módulos juegan un papel importante en el servicio rápido. Un módulo dañado puede ser reemplazado por uno nuevo y el dañado puede ser reparado en un centro de servicio
	Actualización	Los productos modulares ofrecen mejores posibilidades de actualización y reconstrucción. Varias empresas han explotado las estructuras de los productos modulares para que los vendedores puedan dar una cotización detallada de los precios más rápidamente.
	Reciclaje	Para una mejor reciclabilidad, el número de materiales diferentes debe ser minimizado en un módulo y el material ambientalmente hostil debe ser agrupado en un módulo.

Tabla 3.1.Lista de controladores modulares [4].

3.5.2. Metodología DSM (Matriz de estructuras de diseño)

La metodología DSM (por sus siglas en inglés) es desarrollada para identificar las relaciones que se presentan entre los elementos de un sistema. Permite distinguir las variables de los componentes en un sistema en el que están interactuando. A partir de un algoritmo de tipo clúster, se presenta una solución que optimiza la cercanía de las características de los productos, procesa información desde la perspectiva del flujo de proceso y la arquitectura del sistema, igualmente desde la interacción compleja inherente en los diferentes sistemas de desarrollo para converger en un proceso eficaz de desarrollo de producto [38].

Es posible mostrar mediante la matriz de desarrollo las diversas formas de las estructuras en el desarrollo de Producto. Esta matriz hace un mapeo de la Arquitectura de Producto en una estructura organizacional y predice los patrones de las comunicaciones técnicas que debe tener la estructura, este tipo de procesos facilita que los diseños puedan verse de una manera modular global y permite ver como se alinea la arquitectura [39].

La partición de productos en módulos se realiza en base a un modelo de las relaciones funcionales. Estas relaciones se ven optimizadas también en un DSM sólo definiendo las entradas y las relaciones. Los sistemas modulares son aquellos en los que las interfases están bien definidas, y comparten con otros pocos sistemas mientras que en los sistemas integrales las interfases son más complejas y se comparten a través de todo el producto [40].

A través de un DSM se identifican las interacciones de los grupos en el desarrollo de productos modulares [41]. Con esta simulación es posible construir los grupos básicos que se requieren para la identificación y desarrollo de los módulos en la arquitectura del producto como muestra figura 3.7.

Modularidad-Relaciones entre plataformas y programas.

Plataforma de Productos.	Modularidad de Producto	Diseño de producto
<ul style="list-style-type: none"> • Necesidades de Mercado. • Estrategia Gerencial. • Reducción de tiempos de desarrollo. • Reducción de costos. • Productos robustos. • Versatilidad de diseño. • Control de ciclo de vida del producto. • Mercancías. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumentan los tiempos de desarrollo pero reducen el tiempo total cuando se aplican a varios programas. • Permiten un diseño mas robusto. • Sinergia entre los sistemas. • Reduce los tiempos y costos en cambios. 	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de productos orientados a programas específicos. • Independencia de diseño. • Reducción de restricciones en el proceso de desarrollo. • Validaciones particulares de sistemas. • Desarrollo de sistemas y componentes únicos. • Cubren una necesidad específica de mercado.

Figura3.7.Relaciones entre plataformas de producto y programas en desarrollo [39].

La ventaja del DSM es que permite reconocer las relaciones que existen entre los diferentes componentes del sistema, y marca la pauta para el análisis de las plataformas y módulos, con un análisis de agrupación de las relaciones entre los elementos como se muestra en figura 3.8. Existen 4 diferentes tipos de datos con los que se puede realizar un DSM de las relaciones entre ellos:



Figura3.8.Tipos de datos que se pueden representar y analizar con DSM [39].

De acuerdo con el tipo de relación presente en el sistema, la figura 3.9 muestra la representación que generan entre los distintos componentes o sistemas [42]. Cada una de ellas tiene una representación matricial para su análisis.

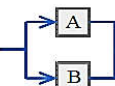
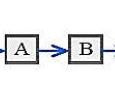
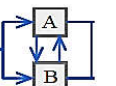
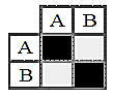
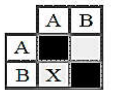
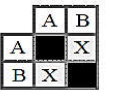
Configuraciones que Configuran el Sistema			
Relación	Paralela	Secuencial	Acoplada
Representación Gráfica			
Representación DSM			

Figura3.9.Representación Gráfica y Matricial de los datos dentro del DSM [42].

La matriz cuadrada (mismo número de renglones y columnas) representa de forma binaria los nodos y los contornos de las relaciones entre los distintos datos introducidos. En la Figura 3.10 se muestra un DSM, en este caso para secuencias de tareas [43].

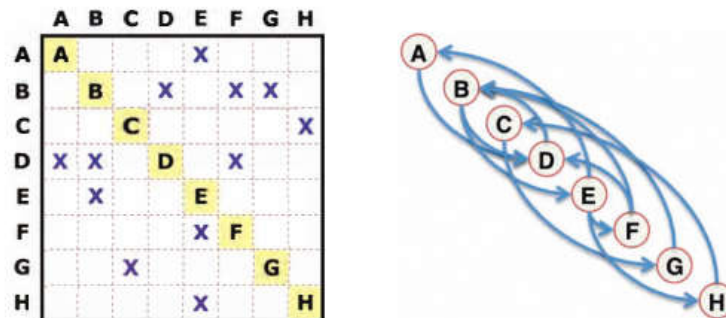


Figura3.10.Ejemplo de matriz binaria DSM y su grafo equivalente [43].

Una vez realizada la matriz DSM se aplica un algoritmo de agrupamiento para agrupar las funciones o componentes para que las interacciones dentro de los grupos se maximicen y entre los grupos se minimicen. Los grupos formados son posibles candidatos de módulos. Hay muchos algoritmos y se puede desarrollar uno propio para satisfacer las necesidades de un caso específico. La idea básica de un algoritmo de agrupamiento es reordenar las filas y columnas para que todas las marcas estén lo más cerca posible de la diagonal o forman un grupo cerrado con otras marcas [44]. En la figura 3.11 se muestra el resultado de aplicar un método de agrupamiento a una matriz DSM.

	1	6	5	4	2	3	7
1		X					
6	X		X				
5	X	X		X			
4			X		X	X	X
2	X			X		X	X
3				X			X
7				X	X	X	

Figura3.11.Matriz DSM una vez realizado el agrupamiento [45].

3.5.3. Metodología FAS

La metodología FAS es un desarrollo propio en busca de diseños modulares, y que está basada en diferentes metodologías, para alcanzar un diseño modular, de plataforma y arquitectura de producto [46].

FAS parte de una matriz de relaciones (DSM), en las que se muestran los diferentes componentes o subsistemas, en la que a través de algoritmos matriciales busca el resultado óptimo en la selección de los sistemas [24]. Los sistemas deben ser diseñados partiendo del concepto de diseño conceptual modular para diferentes plataformas o arquitecturas de producto, analizando las relaciones que existen entre cada uno de los individuos como se muestra en la figura 3.12 [47].

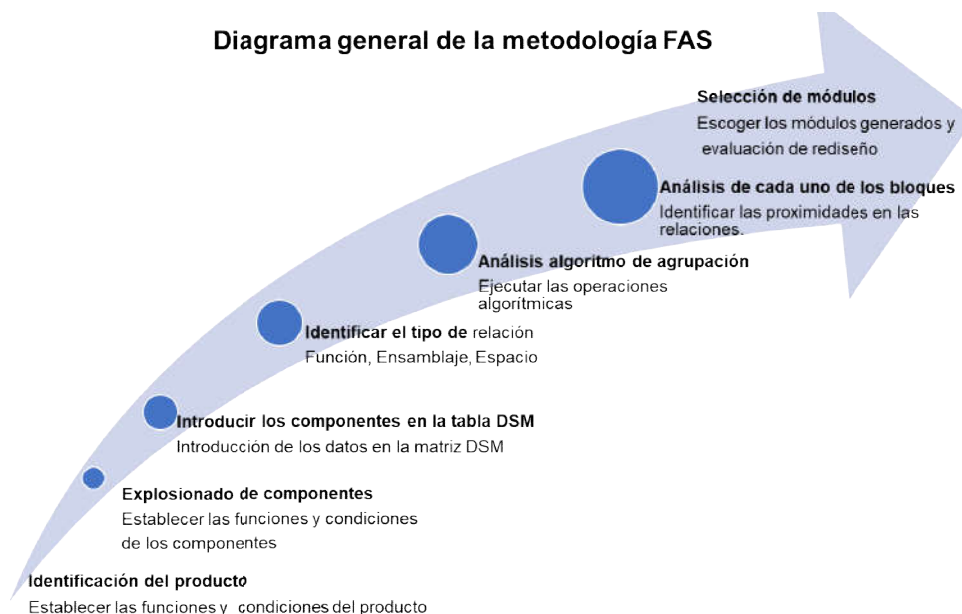


Figura3.12.Esquema general de la metodología FAS [46].

A diferencia de DSM, FAS reconoce energía e información como una misma variable o relación llamada Función como se muestra en la figura 3.13, mientras que las demás relaciones son equivalentes de acuerdo con las definiciones de las variables FAS.

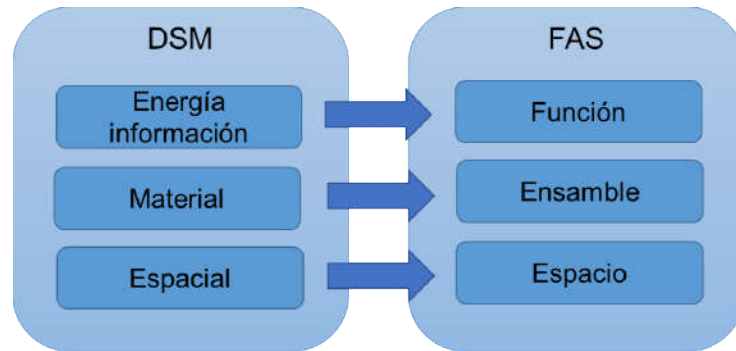


Figura3.13.Comparativa DSM-FAS.

Los 3 tipos de relaciones para el uso de la metodología FAS se asignan de acuerdo con los requerimientos que se tiene en el diseño de sistemas.

Las funciones básicas de cualquier sistema o componente son de cumplir con su funcionalidad (tanto dependiente como independiente), de ensamble como subsistema o componente y la posición espacial que debe ocupar en el producto y se definen a continuación como se muestra en la figura 3.14.

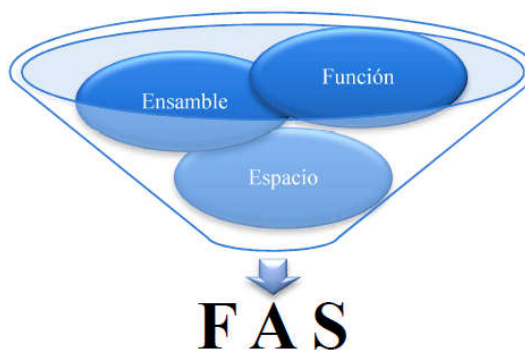


Figura3.14.Tipos de Relaciones FAS [38].

Relaciones Funcionales (F): Son las relaciones funcionales que existen entre los diferentes sistemas, es decir, tanto la función propia que debe cumplir cada sistema y alcanzar los objetivos para lo que es diseñada y requiere el producto global como la afectación entre sistemas de acuerdo con el intercambio de energía o información.

Relaciones de Ensamble (A): Son las relaciones de ensamble entre diferentes sistemas. Hay sistemas que se encuentran físicamente adyacentes a otros para poder ser ensamblados.

Relaciones de Espacio (S): Son las relaciones de espacio entre sistemas. Se deben principalmente al diseño del producto, al espacio disponible y al empaquetamiento de los sistemas en el producto global.

A continuación, se describen los 7 puntos de la metodología [38]:

1. Identificación del producto

El primer paso se trata de la identificación del producto, que puede ser un sistema simple o complejo formado por varios subsistemas.

Al identificar un producto, es necesario conocer las especificaciones técnicas que debe cumplir y para el cual fue desarrollado. Teniendo el conocimiento del sistema, se pueden evaluar las interfaces, entorno y límites tanto físicos como funcionales de los cuales se determinarán las relaciones FAS a analizar.

En la selección del producto, es importante hacer notar que al tratarse de una metodología del ámbito plataforma modular, el sistema puede ser tan complejo como se pretenda.

2. Explosionado de los componentes

Una vez que se conoce el sistema, es indispensable tener un listado de los subsistemas o componentes que lo forman, debido a que el análisis se realiza en categorías inferiores a la del sistema general. Con el explosionado de los componentes, se realizará el proceso de determinar las relaciones FAS para cada una de ellas y entre cada una de ellas por individual

Para la identificación de los componentes debe tomarse en cuenta el conocimiento del cuaderno de cargas o especificaciones de diseño de cada uno en particular para tener una mejor comprensión de los datos de entrada y salida en los resultados del análisis algorítmico.

3. Introducción de los componentes en la tabla DSM

En la tabla DSM se deben incluir todos los componentes que forman parte del sistema, y colocarlos en la columna izquierda y en la fila superior, para entonces poder establecer las relaciones entre cada uno de los componentes.

La intersección de un mismo elemento en fila y columna está cerrada a introducir valores de relación por el mismo supuesto de que en un mismo sistema la relación es equivalente.

4. Identificar el tipo de relación entre cada componente

El proceso de determinar las relaciones consiste en identificar la Funciones, Ensamblajes y Espacio propio de cada elemento y su relación con el resto de los elementos del sistema. Con este proceso se consideran los siguientes valores de relación:

Si existe una relación de Función, se otorga un valor de relación igual a 1.

Si existe una relación de Ensamble, se otorga un valor de relación igual a 2.

Si existe una relación de Espacio, se otorga un valor de relación igual a 3.

La función que desempeña un sistema está en un orden jerárquico superior, ya que con esto se pretende identificar los módulos necesarios para cumplir con las especificaciones de producto, y el hecho de que la jerarquía de niveles está dada por la necesidad de encontrar nuevos procesos o tecnologías que cumplan con las especificaciones del producto.

5. Análisis algorítmico de agrupación

Una vez que se tienen introducidas las relaciones entre los componentes en la matriz, con ayuda del algoritmo base del DSM es posible obtener una agrupación de los componentes con respecto a las relaciones entre ellos.

Los resultados son expresados en la misma forma matricial, pero los elementos cambian de orden dependiendo de los conjuntos de relación que presentan más densidad entre sí, esto es, la nueva posición de los elementos presenta los bloques de elementos que se pretenden identificar como modulables.

6. Análisis de cada uno de los bloques

Los grupos o bloques de elementos que resultan de la acción del algoritmo deben ser analizados de manera particular, de modo tal, que permitan ser identificados para cada una de las relaciones que han participado en el proceso (Función, Ensamble, Espacio).

Cada uno de los bloques presenta un determinado grupo de elementos que mantienen relación entre sí, y que por lo tanto deben tomarse en cuenta para un estudio de viabilidad de modulación.

7. Selección de módulos

De acuerdo con el índice de propagación del cambio del bloque y al grado de centralidad de los componentes, se verifica que los módulos generados permiten establecer los sistemas modulares.

La revisión de la viabilidad y factibilidad de los nuevos módulos está dada por el análisis del cumplimiento de las cargas y especificaciones de los sistemas que se analizaron en el punto 1; Ya que de esta forma se sabe si los módulos encontrados son factibles por cumplir con las especificaciones originales.

Por lo tanto, es importante que el grupo que realiza la entrada de datos a la matriz DSM realice también una comprobación de las funciones originales que aseguren en correcto funcionamiento de los nuevos niveles de sistemas modulares. La importancia de conocimiento sobre los sistemas es trascendente para comenzar con los nuevos desarrollos modulares.

La comprobación del funcionamiento de FAS, parte de que el producto final modular es igual al producto inicial antes de ser separado y tratado por los distintos pasos de la metodología.

Capítulo 4

Elemento finito

4.1. Introducción

En este capítulo se presentará el concepto e historia del método de elemento finito, así como las ecuaciones utilizadas. Se presentan los pasos, para la formulación del método de elementos finitos y la solución de un problema estructural. Además, se menciona la formulación de un análisis modal.

4.2. Historia de método de elemento finito.

El método de elemento finito es conocido desde hace varios años en su forma conceptual, el desarrollo moderno de esta técnica comienza en 1940, específicamente en el campo de ingeniería estructural, con los trabajos de Hrennikoff, A. [48] en 1941 y Mc Henry, D. [49] en 1943, quienes propusieron el uso de líneas en una dimensión para representar elementos como barras o vigas para el cálculo de esfuerzos en sólidos con sección transversal continua.

Poco después de Hrennikoff, A. McHenry, D. y Newmark, N. [50] ofrecieron un mayor desarrollo de estas ideas de discretización, mientras que Kron, G [51,52] estudió las propiedades topológicas de los sistemas discretos. Siguió un período de inactividad de diez años, que se rompió en 1954 cuando Argyris y sus colaboradores comenzaron a publicar una serie de artículos que cubrían ampliamente el análisis estructural lineal y las técnicas de solución eficiente bien adaptadas a la computación digital automática.

La solución real de los problemas de esfuerzo plano por medio de elementos triangulares cuyas propiedades se determinaron a partir de las ecuaciones de la

teoría de la elasticidad se dio por primera vez en 1956 en un documento de Turner, J., Clough, R, Martin H. y Topp, L. [53].

Fue hasta 1960, cuando la frase elemento finito fue introducida para describir este tipo de trabajos. La frase fue introducida por primera vez por Clough, R. cuando por primera vez se usaron elementos triangulares y rectangulares para el análisis de esfuerzos [54].

La técnica de matriz para placas rectangulares considerando elementos de flexión, fue desarrollada por Melosh en 1961. La cual se fue seguida por la matriz de rigidez desarrollada para contenedores de presión 1963 por Grafton y Strome.

A partir de 1960 comenzaron a crearse paquetes computacionales de elemento finito, entre los primeros surgió Nastran (1965) lo cual fue un punto de partida para la generación de paquetes computacionales como Ansys(1969), Ls Dyna, Algor, Cosmos, Abaqus(1978), entre otros.

La línea de tiempo de los desarrollos en el campo del método de los elementos finitos se da en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1.Línea temporal de la evolución de los elementos finitos [55].

Año	Técnica de análisis
1930	Collar y Duncan formularon la aeroelasticidad discreta en forma de matriz
1941	Método de estructura
1943	Courant estudios del problema de torsión de St. Venant
1954 1955	Argyris publica técnicas de solución eficientes en papel clásico que resuelven la tensión plana
1956	Argyris presentó una unificación formal de los métodos de fuerza y desplazamiento utilizando teoremas de energía dual
1959	Greenstadt's enfoque de la discretización
1959	Turner propuso el método de rigidez directa
1960	Frase de elemento finito introducida
1964	Primera oferta comercial de software de elementos finitos

En 1965 el método de los elementos finitos recibió una interpretación aún más amplia cuando Zienkiewicz, C. y Cheung, Y. [56] informaron que era aplicable a todos los problemas de campo que se pueden plasmar en forma variaciones.

4.3. Método de elemento finito (FEM)

El método de elemento finito (FEM), o análisis de elemento finito (FEA), es un método numérico para resolver problemas de ingeniería y física matemática. Puede ser visto como un método para encontrar soluciones aproximadas para ecuaciones diferenciales parciales, o como herramienta para transformar ecuaciones diferenciales parciales en ecuaciones algebraicas [57].

La base del FEM consiste en considerar pequeñas partes llamadas elementos, los cuales subdividen el dominio del sólido estructural, conectándose unos con otros en un número finito de puntos llamados nodos. La figura 4.1 muestra un ejemplo de mallado que consiste de nodos y elementos conectados entre sí [58].

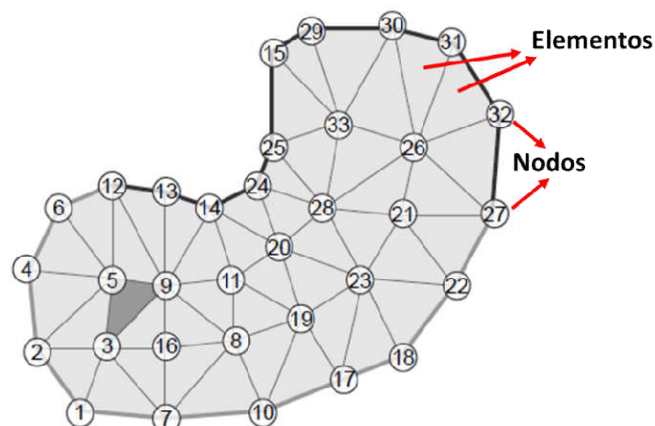


Figura4.1.Numeración global de los nodos en el dominio [59].

La transformación de un problema de ingeniería a una representación matemática es lograda al discretizar el dominio de interés por medio de subdominios o elementos, tal y como se observa en la figura 4.2. La selección de estos depende de la geometría y física del problema [60].

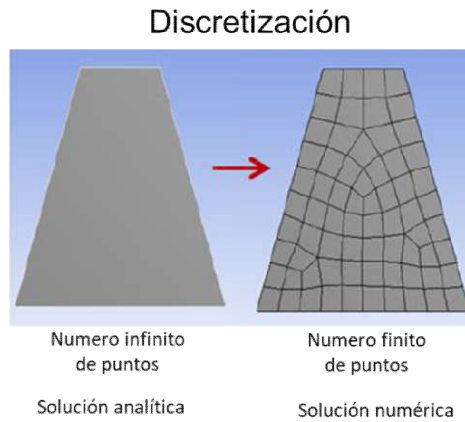


Figura4.2.Técnica de discretización [31].

4.4. Ecuaciones aplicadas en el método de elemento finito.

Existen dos enfoques directos generales conocidos por el método de los elementos finitos aplicados a los problemas de mecánica estructural.

Para obtener las ecuaciones gobernantes, primero se utilizan las ecuaciones de equilibrio. Luego se encuentran las ecuaciones adicionales necesarias introduciendo ecuaciones de compatibilidad.

El segundo enfoque, llamado método del desplazamiento, o de la rigidez, asume los desplazamientos de los nodos como las incógnitas del problema.

Se presentan los pasos, utilizados en la formulación del método de elementos finitos y la solución de un problema estructural. El propósito de establecer estos pasos generales es exponer el procedimiento en general seguido de una formulación de elementos finitos de un problema. Esto ayuda a comprender fácilmente los pasos cuando se trabaja específicamente para resortes, barras, vigas, marcos, esfuerzo plano, axisimétrico, tridimensional, flexión de placas, transferencia, y el flujo de fluidos [57]:

1. Discretizar y seleccionar los tipos de elementos.

Implica dividir el cuerpo en un sistema equivalente de elementos finitos con nodos asociados y elegir el tipo de elemento más apropiado para modelar el comportamiento físico real. El número total de elementos utilizados y su variación en el tamaño y el tipo dentro de un cuerpo dado. La elección del elemento más apropiado para un problema particular es una de las principales

tareas que debe llevar a cabo el diseñador/analista. Los elementos que comúnmente empleados en la práctica se muestran en figura 4.3.

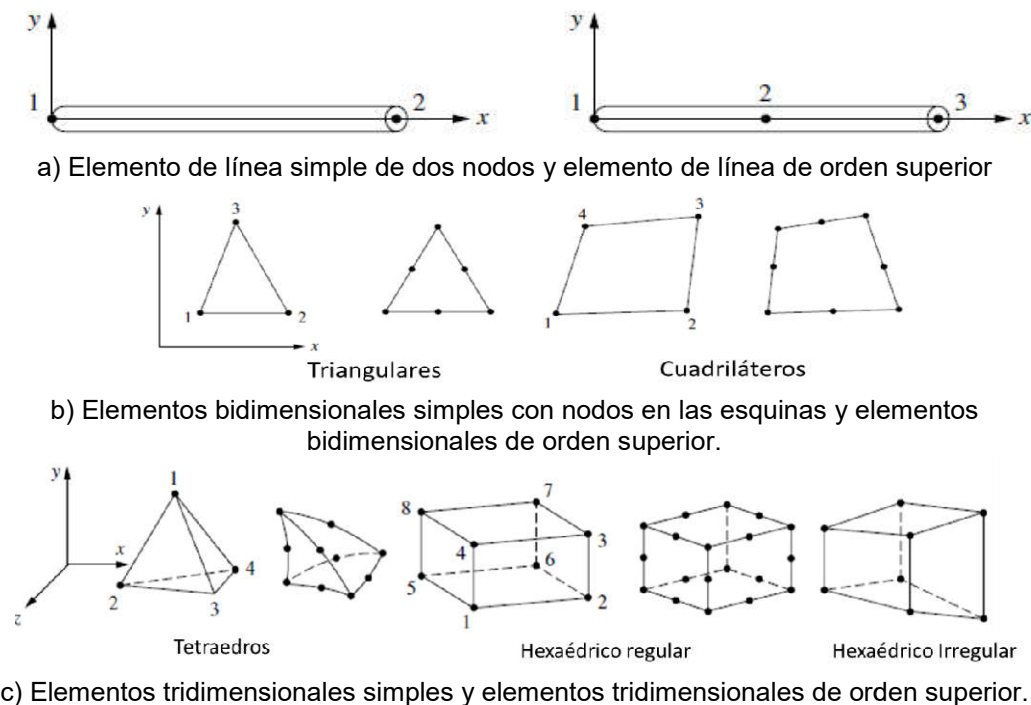


Figura 4.3. Tipos de elementos finitos simples de orden inferior con esquina sólo nodos y elementos de orden superior con nodos intermedios [57].

Los elementos de línea (Figura 4.3 (a)) consisten en elementos de barra (o armazón) y de viga. Tienen un área de sección transversal, pero suelen estar representados por segmentos de línea.

Los elementos básicos bidimensionales (Figura 4.3 (b)) son cargados por fuerzas en su propio plano. Son triangulares o elementos del cuadrilátero. Los elementos bidimensionales más simples tienen nodos de esquina sólo (elementos lineales) con lados o límites rectos.

Los elementos tridimensionales más comunes (Figura 4.3 (c)) son los tetraédricos y elementos hexaédricos; se utilizan cuando es necesario realizar un análisis de tensión tridimensional.

2. Seleccionar una función de desplazamiento

Implica elegir una función de desplazamiento dentro de cada elemento. La función se define dentro del elemento utilizando los valores nodales del elemento. Los polinomios lineales, cuadráticos y cúbicos son funciones de uso frecuente porque son sencillas de trabajar en la formulación de elementos finitos. Para un elemento bidimensional, la función de desplazamiento es una función de las coordenadas en su plano (por ejemplo, el plano x-y). Se aproxima mediante un modelo discreto compuesto de un conjunto de funciones continuas por piezas definidas dentro de cada dominio o elemento finitos.

3. Definir relación deformación/desplazamiento y esfuerzo/deformación

Las relaciones esfuerzo/desplazamiento y esfuerzo/deformación son necesarias para derivar las ecuaciones de cada elemento finito. En el caso de la deformación unidimensional, la dirección x, se tiene la tensión ε_x relacionada con el desplazamiento u por:

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx} \quad (4.1)$$

Los esfuerzos deben estar relacionados con las deformaciones unitarias a través la ley constitutiva. La capacidad de definir el comportamiento del material con precisión es lo más importante para obtener resultados aceptables. La más simple de las leyes de esfuerzo/deformación, la ley de Hooke, que se utiliza a menudo en el análisis de esfuerzos, viene dada por:

$$\sigma_x = E \varepsilon_x \quad (4.2)$$

donde σ_x = esfuerzo en la dirección x y E =módulo de elasticidad.

4. Derivar la matriz de rigidez de los elementos y las ecuaciones

El desarrollo de matrices de rigidez de elementos y ecuaciones de elementos se basa en el concepto de coeficientes de influencia de la rigidez [57].

a) Método de Equilibrio Directo

Este método, la matriz de rigidez y las ecuaciones de los elementos que relacionan las fuerzas nodales con los desplazamientos nodales se obtienen utilizando las condiciones de equilibrio de fuerzas para un elemento básico, junto con las relaciones fuerza/deformación. Dado que este método es más fácilmente adaptable a elementos lineales o unidimensionales, este método se trabaja para los elementos de resorte, barra y viga.

b) Métodos de trabajo o energía

Desarrollar la matriz de rigidez y las ecuaciones para los elementos bidimensionales y tridimensionales, es mucho más fácil aplicar un método de trabajo o de energía, el principio de la energía potencial mínima, y el teorema de Castigliano es un método que se utiliza con frecuencia para derivar ecuaciones de elementos son aplicables sólo a los materiales elásticos. Además, el principio de puede utilizarse incluso cuando no existe una función potencial. Sin embargo, los tres principios dan idénticas ecuaciones elementales para materiales lineales-elásticos.

Métodos de Residuos Ponderados

Los métodos de residuos ponderados desarrollan las ecuaciones de los elementos; un ejemplo es el método de Galerkin. Estos métodos son utilizados especialmente cuando no se dispone fácilmente de un funcional de energía como la energía potencial. Los métodos de residuos ponderados permiten aplicar directamente el método de elementos finitos a cualquier ecuación diferencial.

El uso de los métodos mencionados produce las ecuaciones para describir el comportamiento de un elemento.

5. Ensamblar las ecuaciones de los elementos para obtener la o ecuaciones totales e introducen condiciones límite.

En este paso, las ecuaciones de equilibrio nodal de los elementos individuales generados en el paso 4 son ensambladas en las ecuaciones de equilibrio nodal global. Otro método más directo de superposición (llamado el método de la rigidez directa), cuya base es el equilibrio de la fuerza nodal, puede ser utilizado para obtener las ecuaciones globales de toda la estructura. El método de rigidez directa lleva implícito el concepto de continuidad, o compatibilidad, que requiere que la estructura permanezca y que no se produzcan desgarros en ningún lugar de la estructura. La ecuación final ensamblada o global escrita en forma de matriz es:

$$\{f\} = [k]\{d\} \quad (4.3)$$

donde $\{f\}$ es el vector de las fuerzas nodales globales, $[k]$ es la estructura global o matriz de rigidez total, (para la mayoría de los problemas, la matriz de rigidez global es cuadrada y simétrica) y $\{d\}$ es el vector de los grados de libertad nodales de estructura conocidos y desconocidos o de los desplazamientos generalizados. Puede demostrarse que, en esta etapa, la rigidez global la matriz $[k]$ es una matriz singular porque su determinante es igual a cero.

6. Resolver los grados de libertad desconocidos o desplazamientos generalizados

La ecuación (4.3), modificada para tener en cuenta las condiciones límite, es un conjunto de ecuaciones algebraicas simultáneas que pueden escribirse en forma de matriz expandida como:

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ f_4 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \cdot & \cdot & \cdot & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \cdot & \cdot & \cdot & k_{2n} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & \cdot & \cdot & \cdot & k_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ k_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ d_n \end{Bmatrix} \quad (4.4)$$

Donde n es el número total de grados nodales de libertad desconocidos. Estas ecuaciones pueden resolverse para el d_s utilizando un método de eliminación (como el método de Gauss) o un método iterativo (como el método de Gauss-Seidel).

7. Calcular esfuerzo a partir de desplazamiento y ecuaciones constitutivas.

Para el análisis esfuerzo estructural, se obtienen importantes cantidades secundarias de esfuerzos y deformaciones, ya que son expresan directamente en términos de los desplazamientos como se muestran en el paso 6. Pueden calcularse las relaciones de esfuerzo y desplazamiento y esfuerzo y deformación, como se muestran en las ecuaciones (4.1) y (4.2) para la deformación unidimensional que se observa en el paso 3.

8. Interpretar los Resultados.

El objetivo final es interpretar y analizar los resultados para usarlos en el proceso de diseño/análisis. La determinación de los lugares de la estructura en los que se producen grandes deformaciones y esfuerzos.

La manera más práctica y sencilla de explicar la concepción de las ecuaciones para el método de elemento finito es por medio del análisis de un sistema de resorte descrito en la figura 4.4.

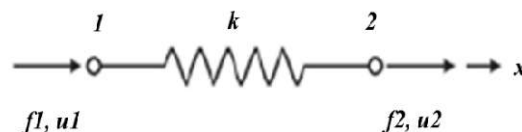


Figura 4.4. Diagrama de cuerpo libre de un elemento de resorte lineal.

Como se muestra en la figura. 4.4, un resorte lineal con rigidez k tiene dos nodos. Cada nodo está sujeto a cargas axiales de f_1 y f_2 , lo que da lugar a desplazamientos de u_1 y u_2 en sus direcciones positivas definidas. Sometida a estas fuerzas nodales, la deformación resultante del resorte se convierte en [60]:

$$u = u_1 - u_2 \quad (4.5)$$

Que está relacionado con la fuerza que actúa sobre el resorte por:

$$f_1 = ku = k(u_1 - u_2) \quad (4.6)$$

El equilibrio de fuerzas requiere que:

$$f_2 = -f_1 \quad (4.7)$$

Esto sería igual a

$$f_2 = k(u_2 - u_1) \quad (4.8)$$

Juntando las ecuaciones (4.6) y (4.8) reescribiendo se obtiene:

$$\begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} \quad (4.9)$$

donde, la matriz constituida por k y $-k$ es conocida como matriz de rigidez, u es el desplazamiento y $\{f\}$ la fuerza global resultante en el sistema. Conforme se agregan resortes al sistema aumenta el número de nodos, fuerzas y constantes elásticas, con ello lo hace también la complejidad del sistema y el tamaño de la matriz de rigidez [60].

Hay tres conjuntos básicos de ecuaciones incluidos en la teoría de la elasticidad estos conjuntos de ecuaciones son:

- Ecuaciones diferenciales de equilibrio.
- Ecuaciones diferenciales de esfuerzo/desplazamiento y compatibilidad.
- Las leyes constitutivas de esfuerzo/deformación.

Inicialmente se considera el equilibrio de un elemento plano como se muestra la figura 4.5 sometido a esfuerzos normales σ_x y σ_y , actuando en las direcciones x y y , respectivamente. El esfuerzo cortante τ_{xy} actúa en el borde x en la dirección y . El esfuerzo τ_{yx} actúa en el borde y en dirección x . El momento de equilibrio del elemento resulta en [57]:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad (4.10)$$

Por lo tanto, existen tres diferentes esfuerzos representados por el vector columna.

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.11)$$

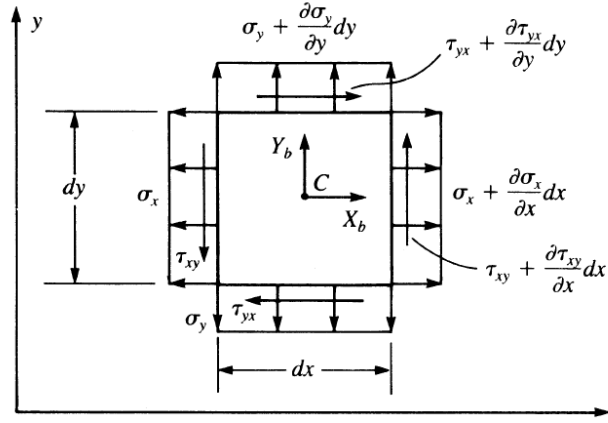


Figura 4.5. Estado de esfuerzos en dos dimensiones [57].

En la figura 4.6. se muestra el estado de esfuerzos tridimensional, los esfuerzos sometido σ_x , σ_y , σ_z actuando en las direcciones x , y , z , respectivamente. El momento de equilibrio del elemento resulta en [57]:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad (4.12)$$

Por lo tanto, existen seis diferentes esfuerzos representados por el vector columna.

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} \quad (4.13)$$

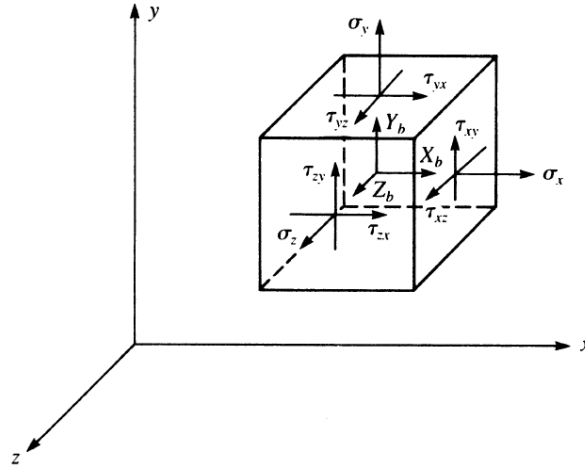


Figura 4.6. Estado de esfuerzos en tres dimensiones [57].

El elemento diferencial que se muestra en la figura 4.7, donde el estado no deformado se representa por las líneas discontinuas y la forma deformada se representa por las líneas sólidas. El elemento es mostrado para ser desplazado en cantidades de u y v en las direcciones x y y en el punto A, y para desplazar o extender una cantidad adicional $(\partial u / \partial x) dx$ a lo largo de la línea AB, y $(\partial v / \partial y) dy$ a lo largo de la línea AC en las direcciones x y y respectivamente. Además, observando las líneas AB y AC, podemos observar que el punto B se mueve hacia arriba una cantidad $(\partial v / \partial x) dx$ con respecto a A, y el punto C se mueve a la derecha una cantidad $(\partial u / \partial y) dy$ con respecto a A.

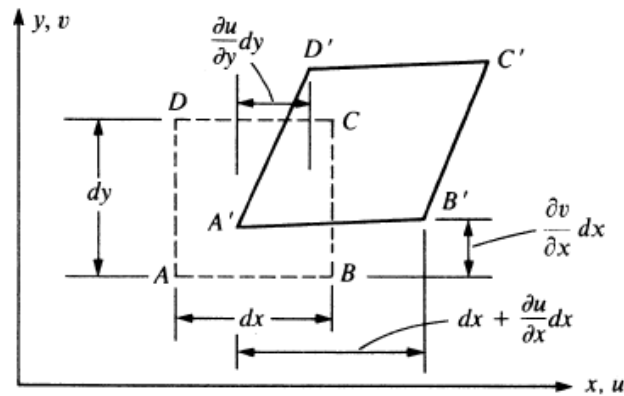


Figura 4.7. Desplazamientos y rotaciones en un elemento en el plano x-y [57].

De las definiciones generales de deformación normal y cortante y utilizando la figura 4.7 se obtiene:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (4.14)$$

Las tensiones ε_x y ε_y son los cambios en longitud por unidad medida del material originalmente paralela a los ejes x y y respectivamente, cuando el elemento sufre deformación. Estas deformaciones son llamadas normales. Deformación γ_{xy} es el cambio en el ángulo entre d_x y d_y cuando el elemento sufre deformación y es conocido por cortante.

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.15)$$

Para las condiciones de esfuerzo plano:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (4.16)$$

Dónde:

$$[D] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Es llamada la matriz constitutiva, E es el módulo de elasticidad y ν es el coeficiente de Poisson. En la ecuación (4.16), $\{\sigma\}$ y $\{\varepsilon\}$ son definidas por las ecuaciones (4.13) y (4.15) respectivamente.

4.5. Análisis modal

Se considera el movimiento de un sistema de resorte de un grado de libertad. En la figura 4.8, se muestra el sistema masa resorte de un solo grado de libertad sometido a una fuerza dependiente del tiempo $F(t)$. Donde k representa la rigidez o constante del resorte, y m representa la masa del sistema.

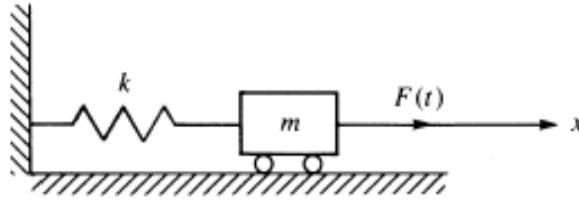


Figura4.8.Sistema masa-resorte sometido a una fuerza dependiente del tiempo [57].

El diagrama de cuerpo libre de la masa se muestra en la figura 4.9. La fuerza del resorte $T = kx$ y la fuerza aplicada $F(t)$ actúan sobre la masa, y el término masa-tiempo-aceleración se muestra por separado.

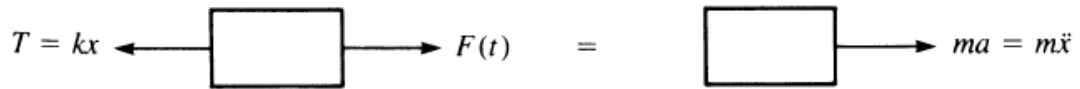


Figura4.9.Diagrama de cuerpo libre de la masa de la Figura 4.8 [57].

Aplicando la segunda ley de movimiento de Newton, $f = ma$, a la masa, se obtiene la ecuación de movimiento en la dirección x como:

$$F(t) - kx = m\ddot{x} \quad (4.18)$$

donde un punto sobre una variable denota diferenciación con respecto al tiempo; es decir, $\dot{x} = \frac{d^2x}{dt^2}$. Reescribiendo la Ecuación (4.12) en forma estándar, se obtiene:

$$m\ddot{x} + kx = F(t) \quad (4.19)$$

La ecuación (4.19) es una ecuación diferencial lineal de segundo orden cuya solución estándar para el desplazamiento x consiste en una solución homogénea y una solución particular.

La solución homogénea de la ecuación (4.19) es la solución obtenida cuando el lado derecho se iguala a cero. Se obtienen varios conceptos útiles con respecto a las vibraciones al considerar esta vibración libre de la masa, es decir, cuando $F(t)=0$. Para la definición de estas ecuaciones son mostradas en el anexo I.

Las frecuencias naturales son necesarias en un análisis de vibración y también son importantes cuando se elige un paso de tiempo adecuado para un análisis de dinámica estructural.

Las frecuencias naturales se determinan resolviendo la ecuación (4.20) en ausencia de las funciones forzadas $F(t)$. Por lo tanto, la ecuación matricial se resuelve de la siguiente manera:

$$[M]\{\ddot{d}\} + [K]\{d\} = 0 \quad (4.20)$$

La solución estándar para $\{d(t)\}$ viene dada por la ecuación armónica en el tiempo:

$$\{d(t)\} = \{d'\}e^{i\omega t} \quad (4.21)$$

donde $\{d'\}$ es la parte de la matriz de desplazamiento nodal llamada modos naturales que se supone que es independiente del tiempo, i es el número imaginario dado por $i = \sqrt{-1}$, y ω es una frecuencia natural.

Diferenciando la ecuación (4.17) dos veces con respecto al tiempo, se obtiene:

$$\{\ddot{d}(t)\} = \{d'\}(-\omega^2)e^{i\omega t} \quad (4.22)$$

De la ecuación anterior se obtiene el valor característico λ_k^h y los vectores característicos ψ_k , $k = 1, 2, \dots, n_{eq}$ que satisfacen.

$$(K - \lambda_k^h M)\psi_k = 0 \quad (4.23)$$

El desarrollo de la ecuación 4.20, se mostrado en el anexo II para poder obtener la ecuación 4.23.

Capítulo 5

Caso de Estudio: Caja de baterías modular

5.1. Introducción.

En este capítulo se muestra la metodología de trabajo descrita en la Figura 5.1, la cual comienza con un estudio de metodología de diseño modular, seguido de la etapa de diseño, se diseñan y ensamblan los componentes propuestos para la caja de baterías, para después evaluar su desempeño a través de un análisis de elemento finito y en base a los esfuerzos obtenidos, realizar un análisis modal, el cual arroja la frecuencia natural de la caja de la batería.

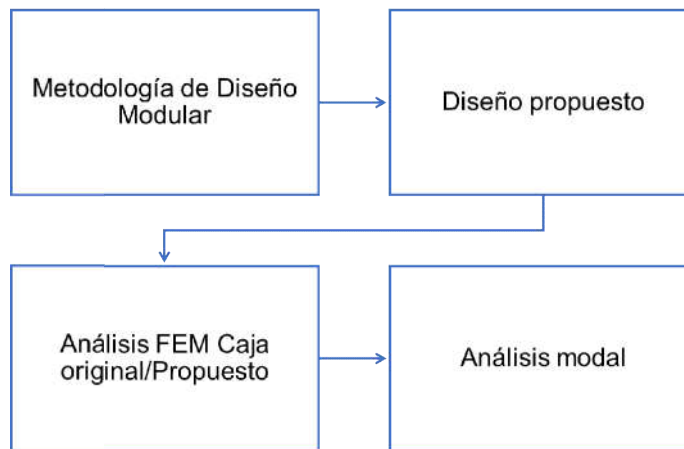


Figura5.1.Metodología, utilizada durante este proyecto de investigación.

5.2. Metodología de diseño modular

Al haber estudiado las diferentes metodologías de diseño modular se optó por trabajar con la metodología FAS, mencionada en el capítulo 3, tiene como objetivo el identificar los sistemas modulares dentro del diseño de un producto.

Como primer paso se analizaron los diferentes tipos de cajas de baterías que se manejan dentro del sistema NAVISTAR, para poder seleccionar la caja con mayor volumen y poder trabajar con la metodología FAS, la caja seleccionada fue la de 30”.

Después de haber seleccionado la caja de baterías se siguieron los pasos de la metodología FAS, para poder realizar la reducción de componentes en la caja seleccionada.

1. Identificación del producto.

Para el análisis con la metodología FAS, fue importante el conocimiento de los diferentes sistemas en cuanto a función, volumen, materiales, espacio, ensamble, métodos de fabricación para poder introducir de manera correcta los datos en la matriz. La caja de baterías de 30” se muestra en la figura 5.2.

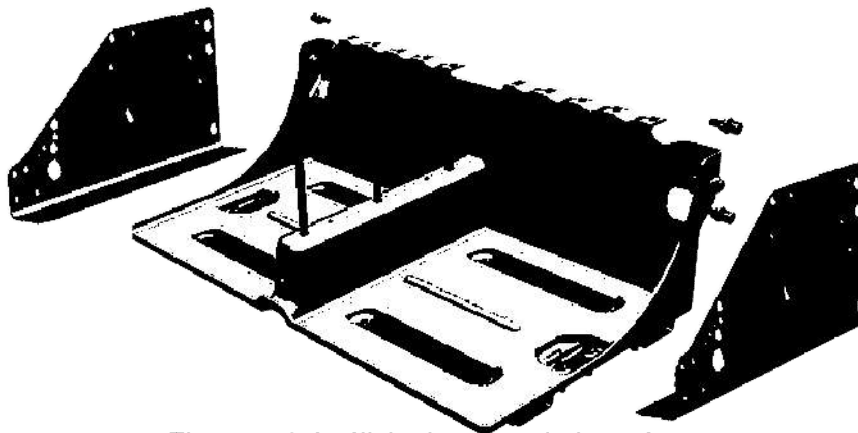


Figura 5.2. Análisis de cajas de baterías

2. Explosionado de los componentes.

La caja de baterías cuenta con 66 partes y 12 diferentes partes como se muestra en la figura 5.3. que contribuyen al desarrollo de la matriz de relaciones DSM con la metodología FAS, a través de la cual, por medio de algoritmos, se generarán los bloques que representan las posibilidades de modularización o estandarización.

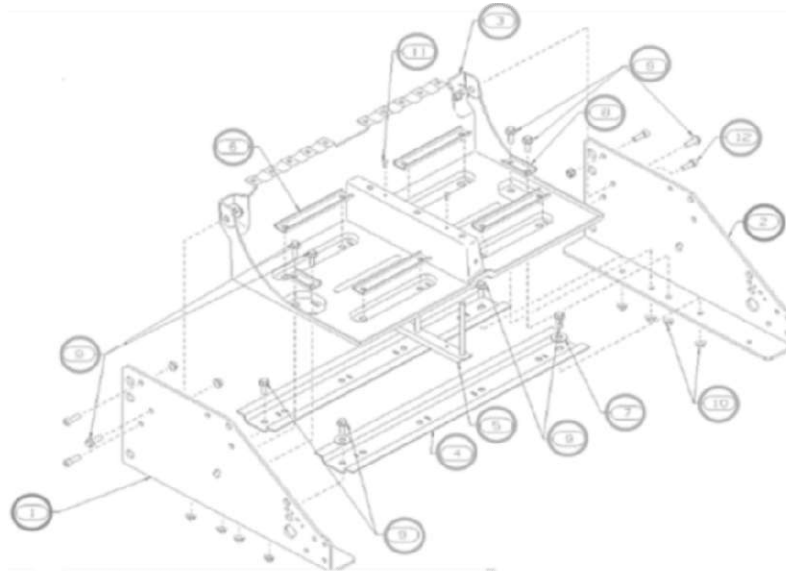


Figura 5.3. Caja de baterías 30" explosionado.

3. Introducir los componentes en la tabla DSM.

Con la vista explosionada del diseño de la caja de baterías se genera la matriz DSM de relaciones para cada uno de los componentes con las relaciones propuestas por la metodología FAS (Funcional-Ensamble-Espacio) como se muestra en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. DSM Componentes Caja de baterías.

#	Componente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Soporte lateral izquierdo	■											
2	Soporte lateral derecho		■										
3	Bandeja			■									
4	Canal				■								
5	Soporte inferior					■							
6	Soporte tanque						■						
7	Arandela							■					
8	Soporte lateral								■				
9	Perno hexagonal									■			
10	Tuerca hexagonal										■		
11	Remache											■	
12	Tornillo hexagonal												■

4. Identificar el tipo de relación entre cada componente

Para cada uno de los componentes es necesario determinar la relación que aplica, de acuerdo con:

- Las relaciones de función se muestran con el número 1.
- Las relaciones de ensamble con el número 2
- Las relaciones de espacio con el número 3.

Los espacios en blanco se consideran con el valor de 0, y sirven para reconocer que la relación es nula y los valores son utilizados matemáticamente en el proceso de optimización como se muestra en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Tabla 5.2. DSM Caja de baterías.

#	Componente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Soporte lateral izquierdo		0	0	2	0	0	3	0	0	0	0	0
2	Soporte lateral derecho	0		0	2	0	0	3	0	0	0	0	0
3	Bandeja	2	2		1	1	2	0	2	0	0	0	0
4	Canal	2	2	1		0	0	3	0	0	0	0	0
5	Soporte inferior	0	0	1	0		0	0	0	0	0	2	0
6	Soporte tanque	0	0	2	0	0		0	0	0	0	0	0
7	Arandela	2	2	0	2	0	0		0	0	0	0	0
8	Soporte lateral	0	0	2	0	0	0	0		0	0	0	0
9	Perno hexagonal	2	2	0	2	0	0	0	2		0	0	0
10	Tuerca hexagonal	2	2	0	0	0	0	2	0	0		0	0
11	Remache	0	0	3	0	2	0	0	0	0	0		0
12	Tornillo hexagonal	2	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	

Se calcula el grado de centralidad con ayuda del programa Keyplayer para identificar los nodos con mayor número de relaciones como se muestra en la tabla 5.3:

Tabla 5.3. Grado de centralidad.

	1 Outdeg	2 Indeg
1. Soporte lateral izquierdo	2.000	6.000
2. Soporte lateral derecho	2.000	6.000
3. Bandeja	6.000	5.000
4. Canal	4.000	5.000
5. Soporte inferior	2.000	2.000
6. Soporte tanque	1.000	1.000
7. Arandela	3.000	4.000
8. Soporte lateral	1.000	2.000
9. Perno hexagonal	4.000	0.000
10. Tuerca hexagonal	3.000	1.000
11. Remache	2.000	1.000
12. Tornillo hexagonal	3.000	0.000

La representación gráfica de la matriz DSM a partir del programa Keysoft se muestra en la figura 5.4, el componente clave en el diseño es la bandeja de la batería por compartir el CPI tanto con soportes de forma individual al tener un mayor número de relaciones con el resto de los componentes, se dificulta su modularización.

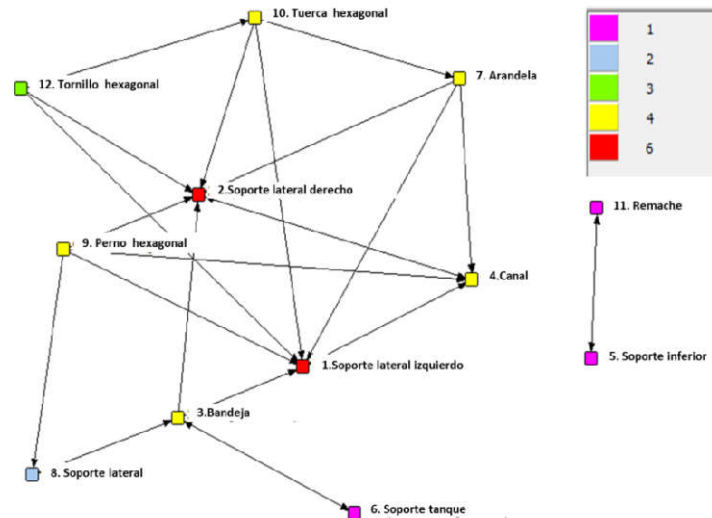


Figura 5.4. Red de relaciones de los elementos de la caja de baterías.

En la matriz de la tabla 5.2 el orden de los componentes es aleatorio, ya que a través del algoritmo clúster la nueva posición que ocupe en la tabla será en base al tipo y grupo de relaciones en el agrupamiento de los elementos.

5. Análisis algorítmico de agrupación

Una vez generada la matriz y su representación gráfica, se conocen las dependencias entre cada elemento a través del algoritmo clúster como se muestra en la tabla 5.4. y figura 5.5

Tabla 5.4. Dependencia de los componentes.

#	Componente	1	2	3	4	5	6	8
1	Soporte lateral izquierdo	1	0	0	2	0	0	0
2	Soporte lateral derecho	0	1	0	2	0	0	0
3	Bandeja	2	2	1	1	1	2	2
4	Canal	2	2	1	1	0	0	0
5	Soporte inferior	0	0	1	0	1	0	0
6	Soporte tanque	0	0	2	0	0	1	0
8	Soporte lateral	0	0	2	0	0	0	1

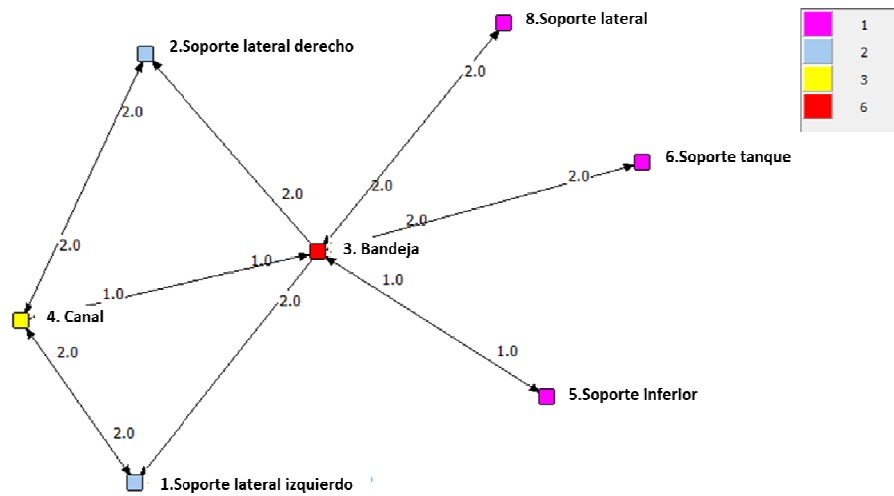


Figura5.5. Red de relación dependencia de elementos.

Los resultados de agrupación obtenidos a través de la metodología FAS serán presentados en el capítulo 6, donde se mencionarán los componentes que son posibles a minimizar.

5.3. Diseño

Para la creación del diseño se utilizó el programa computacional CATIA, en el cual se importó el modelo de la caja de baterías junto con el ensamblaje del larguero, bracket y travesaño como se muestra en la figura 5.6.

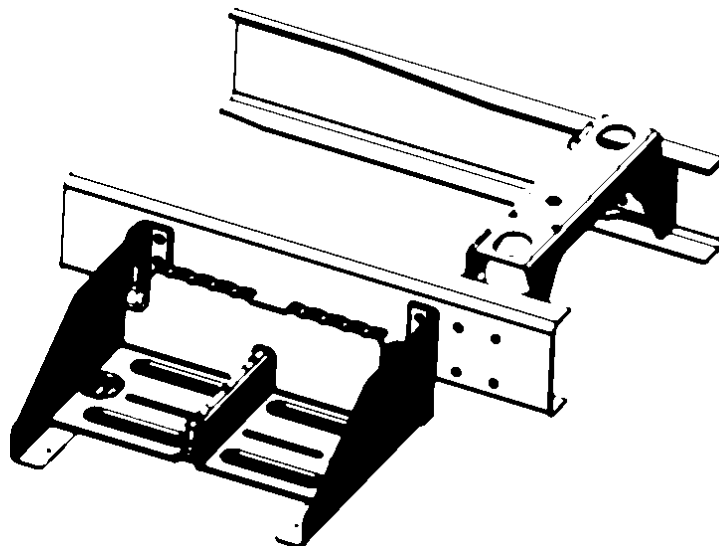


Figura5.6.Modelo caja de baterías.

Con base al modelo original, se generaron cuatro modelos propuestos los cuales se realizaron mediante parámetros sheet metal, los resultados de los modelos creados se presentarán en el capítulo 6.

5.4. Análisis de elemento finito.

Para el análisis de elemento finito se analizaron dos casos, con el programa computacional ANSYS Mechanical, el primer caso para analizar fue el diseño original de la caja de baterías, segundo caso se analizó el diseño propuesto. Esto para poder realizar una comparación del diseño propuesto contra el diseño original y ver que cumplen con las condiciones del modelo.

5.4.1. Preparación de geometrías

Para la preparación de la geometría se importó el modelo original y los modelos propuestos en CATIA como sólidos, al programa computacional Space Claim, en donde los espesores considerados de cada componente.

Debido a que los componentes son importados en un modelo sólido, el primer paso fue extraer la superficie media de cada uno de los componentes con la herramienta de superficies como se muestra en la figura 5.7, esto para analizar la caja de baterías como una superficie en tres dimensiones y no como un cuerpo sólido, lo cual incrementaría el tiempo de cómputo para obtener una solución.

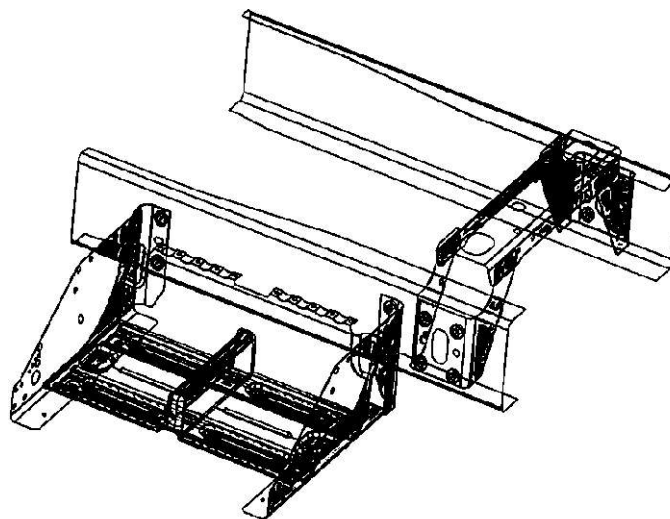


Figura 5.7. Modelo caja de baterías con superficie.

Como segundo paso se realizó un procedimiento llamado división de arandelas, el cual es una herramienta que divide la superficie en círculos concéntricos alrededor de cada barreno de acuerdo con la relación existente entre el tornillo y la perforación en los componentes, para poder extraerla como elementos viga (beams).

5.4.2. Joints

Para poder realizar el análisis de la caja de baterías se crearon joints para modelar los tornillos. Se utilizaron conectores tipo viga, deformables, las zonas rojas indican la zona de contacto de los tornillos con las superficies de los componentes como se muestra en la figura 5.8. Estos conectores fueron usados para cada uno de los casos con los cuales se estará trabajando.

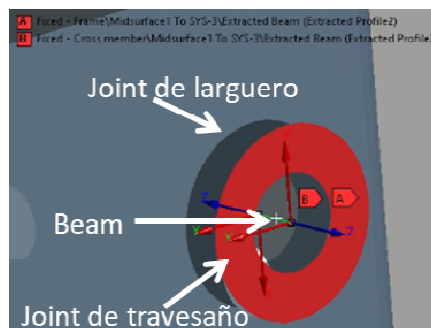


Figura 5.8. Conexiones de joints.

5.4.3. Mallado

El mallado, fue realizado con elementos de cuadriláteros (quad) para el modelo original y el modelo propuesto, se realizó un método mallado de cara y borde a cada una de las divisiones de la superficie en círculos concéntricos alrededor de cada barreno en los componentes, en la tabla 5.5 se muestran las características del mallado para ambos modelos, en los cuales se usó un tamaño de elementos de 15 mm

Tabla 5.5. Características de mallado.

Modelo	Número de elementos	Número de nodos	Tipo de elementos
Modelo original	106966	111154	cuadrilátero
Modelo propuesto	105307	108645	cuadrilátero

En la figura 5.9 se muestra el mallado del modelo original donde se pudo obtener una mejor discretización en los componentes y tener mejores resultados en el cual se aplicó un método de multizone quad/tri y body sizing esto para poder obtener un mallado de solo cuadriláteros.

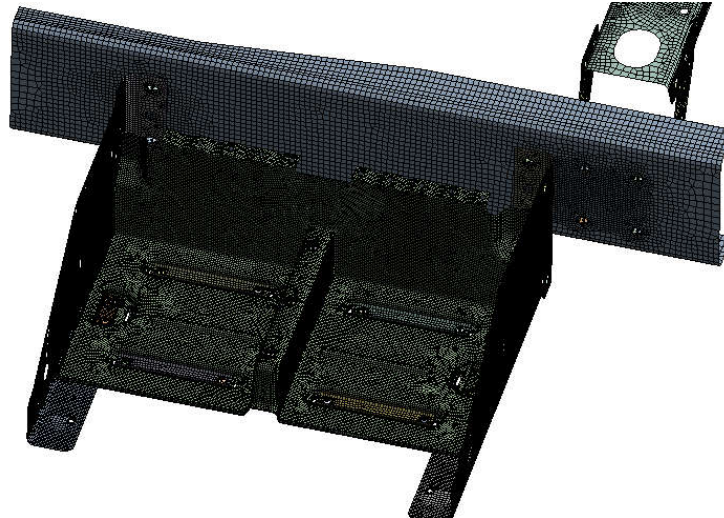


Figura5.9.Mallado modelo origina lineal cuadrático.

5.4.4. Análisis estático

Se realizo un análisis estático estructural al modelo de caja de baterías original para tener un patrón de la distribución de los esfuerzos, con lo cual se podrán comparar con los resultados de los modelos propuestos y así comprender los resultados y determinar si los esfuerzos máximos finales obtenidos cumplirán con los requerimientos de aceptabilidad.

5.4.4.1. Condiciones de carga y frontera

Al realizar el análisis se aplicaron cuatro etapas para el modelo original y los modelos propuestos, como primer etapa se aplicó la carga de las baterías, como segunda etapa se aplicaron las condiciones frontera, y posteriormente se colocaron los casos de gravedad para cada uno de los modelos mencionados.

Para las condiciones de carga se consideraron dos casos diferentes, para 4 baterías y 3 baterías, se aplicó una fuerza remota en la bandeja de la caja, esto considerando el centro de masa de las baterías, acuerdo con la segunda ley de Newton:

$$F = ma \quad (5.1)$$

Donde, F es la fuerza generada por el peso de las baterías, m es la masa de la batería y a es la aceleración gravitacional.

Posteriormente en la figura 5.10 se pueden observar las geometrías con sus respectivos casos de carga asignados en el sistema. En todos los casos de estudios se aplicaron las mismas condiciones de carga

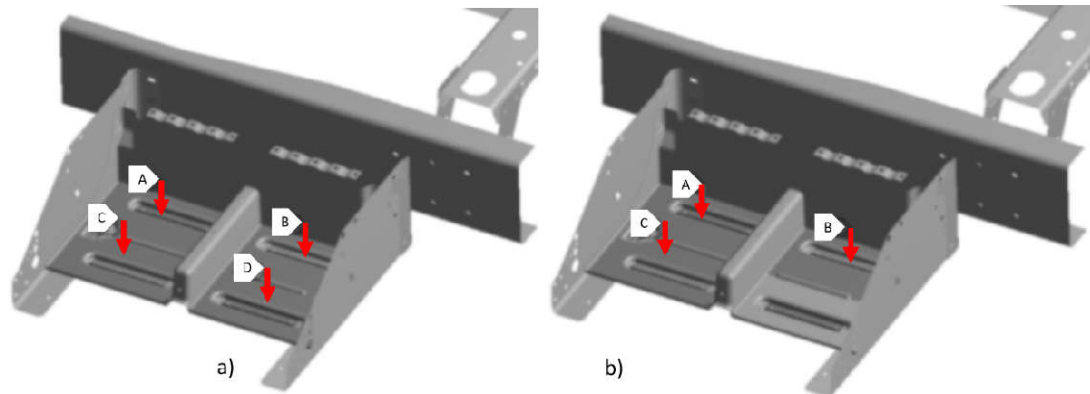


Figura5.10.a) caso de carga con 4 baterías, b) caso de carga con 3 baterías.

Se asignaron condiciones de frontera sobre el modelo, esto con la finalidad de representar la unión fija en el larguero, utilizando la herramienta de soporte fijo ($u_x = u_y = u_z = 0$) las restricciones fueron colocadas en las cuatro esquinas del larguero como se muestra en la figura 5.11, en todos los casos de estudios se colocaron la misma condición de frontera.

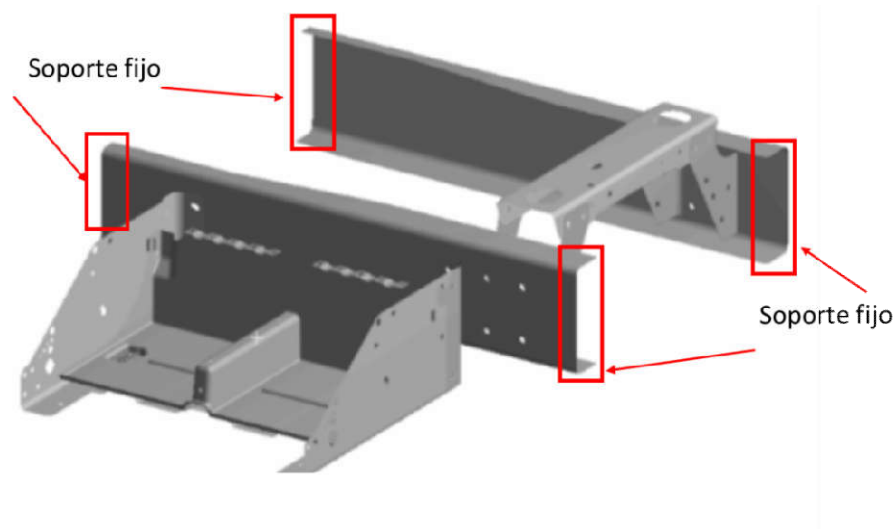


Figura5.11.Condiciones frontera.

5.4.4.2. Caso de gravedad

Como tercer etapa se aplicaron tres casos de carga de gravedad, el primer caso fue aplicado a una aceleración vertical hacia abajo en dirección al suelo de 6g, el segundo a una aceleración lateral hacia adentro del camión (perpendicular al larguero) de 4g y posteriormente una aceleración longitudinal hacia atrás del camión (paralelo al larguero) de 4g, aplicado a 2/3 de la carga inercial máxima de los datos de las pruebas.

Para la aceleración vertical, la carga inercial es de 6g aplicando las condiciones mencionadas la distribución de aceleración sería la siguiente:

$$a = (2/3)6g \quad a = 4g \quad (5.3)$$

$$a = 4(-9.81 \text{ m/s}^2) \quad (5.4)$$

$$a = -39.24 \text{ m/s}^2 \quad (5.5)$$

En la figura 5.12, se muestra la forma aplicada de la aceleración vertical.

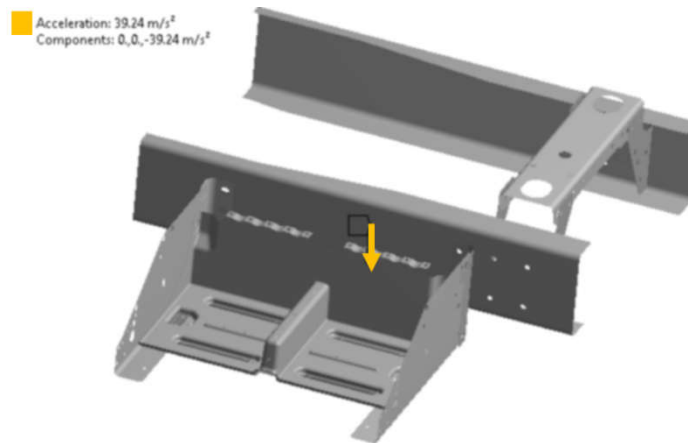


Figura 5.12. Aceleración vertical.

Para la aceleración lateral y longitudinal la carga inercial es de 4g aplicando las condiciones mencionadas la distribución de aceleración sería la siguiente:

$$a = (2/3)4g \quad a = 2.667g \quad (5.6)$$

$$a = 2.667(9.81 \text{ m/s}^2) \quad (5.7)$$

$$a = 26.163 \text{ m/s}^2 \quad (5.8)$$

En la figura 5.13, se muestra la dirección aplicada de la aceleración para ambos casos.

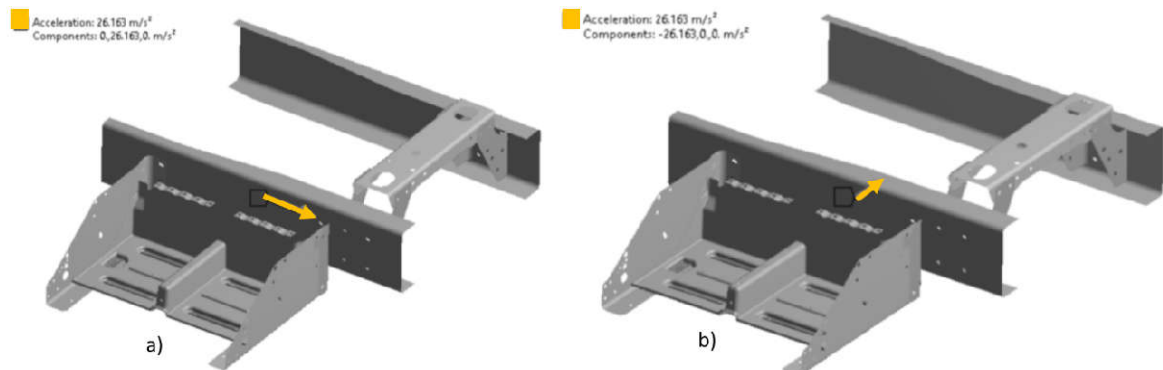


Figura 5.13.a) aceleración lateral, b) aceleración longitudinal.

5.4.5. Análisis modal

Como última etapa del proyecto se aplicó un análisis modal para conocer la frecuencia natural con la que trabaja la caja de baterías, la cual no debe de ser menores al 100% de la frecuencia de los parámetros que trabaja NAVISTAR, este análisis se aplicó tanto en la caja de baterías modelo original y modelo propuesto, para realizar este análisis se usó la interfaz de ANSYS modal, como se muestra en la figura 5.14.

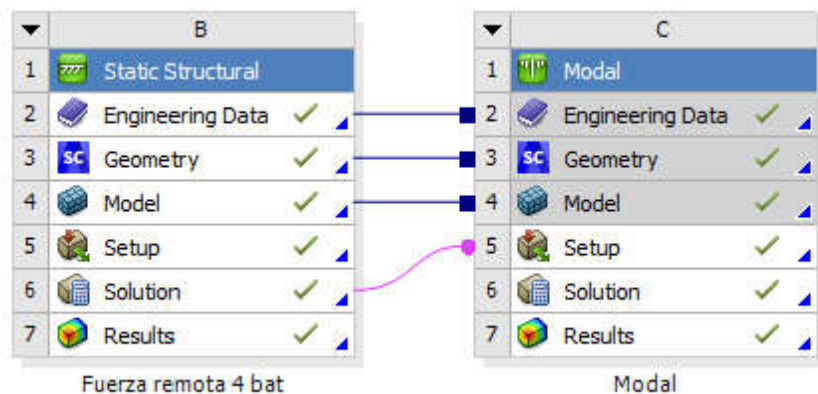


Figura 5.14. ANSYS Modal.

Para este análisis no se consideraron los casos de aceleración, solo fue aplicada la fuerza remota de la baterías tanto para el caso de 4 y 3 baterías. Fueron considerados tres modos para conocer las vibraciones de la caja de baterías. Los resultados de los modos serán mostrados en el capítulo 6.

Capítulo 6

Resultados y discusión.

6.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados y el análisis obtenidos del desarrollo experimental, en el cual, en una primera fase se obtuvieron los resultados de la metodología FAS, como segunda fase se presentan los resultados obtenidos de los modelos propuestos, posteriormente se presentan los resultados obtenidos en los análisis de elemento finito aplicado en el modelo original y modelo propuesto para determinar la distribución de los esfuerzos y comparar los resultados, por último se presentan los resultados del análisis modal.

6.2. Análisis de bloques

Los resultados de agrupación de funciones se presentan en la Tabla 6.1 la relación de función la establecen tanto en el soporte inferior y la bandeja, y éstas cumplen con la función de la carga de las baterías. En la figura 6.1 se muestran los componentes mencionados.

Tabla 6.1.DSM de Relaciones funcionales.

#	Componente	1	2	4	5	3	6	8
1	Soporte lateral izquierdo		0	0	0	0	0	0
2	Soporte lateral derecho	0		0	0	0	0	0
4	Canal	0	0		0	1	0	0
5	Soporte inferior	0	0	0		1	0	0
3	Bandeja	0	0	1	1		0	0
6	Soporte tanque	0	0	0	0	0		0
8	Soporte lateral	0	0	0	0	0	0	

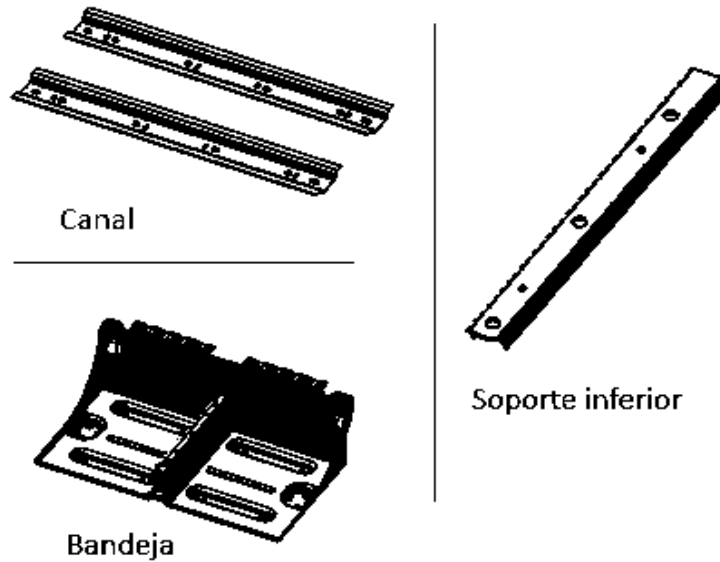


Figura 6.1. Bloque funcional de caja de baterías.

Los resultados de agrupación de ensamble se presentan en la tabla 6.2, de acuerdo con la información de relación de la matriz, los resultados se presentan en dos bloques de agrupamiento.

Tabla 6.2.DSM de relación de ensamblaje.

#	Componente	1	2	4	5	3	6	8
1	Soporte lateral izquierdo		0	2	0	0	0	0
2	Soporte lateral derecho	0		2	0	0	0	0
4	Canal	2	2		0	0	0	0
5	Soporte inferior	0	0	0		0	0	0
3	Bandeja	2	2	0	0		2	2
6	Soporte tanque	0	0	0	0	2		0
8	Soporte lateral	0	0	0	0	2	0	

El bloque de color naranja agrupa el canal, los soportes laterales izquierdo y derecho, que son componentes que soportan la carga de las baterías. El bloque de color azul agrupa la bandeja, soporte tanque y los soportes lateral.

De acuerdo con la figura 6.2 se puede observar que en los bloques generados del algoritmo clúster, los elementos cumplen con la relación de ensamble entre sí y que los resultados del algoritmo son factibles para su modularización.

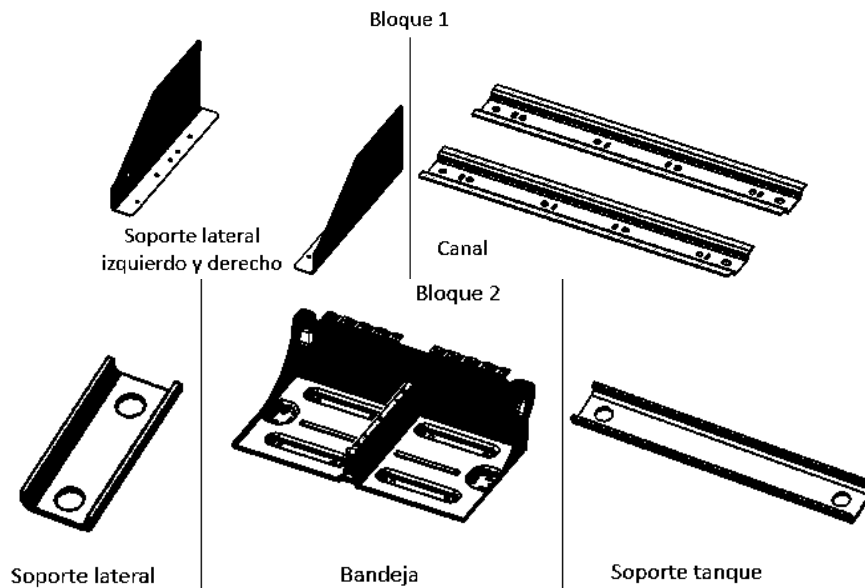


Figura 6.2. Bloque Ensamble caja de baterías.

6.3. Selección de Módulos.

Con especificaciones técnicas de los componentes y sistemas, se determinó la posibilidad de crear módulos y si consiste en un rediseño del sistema o de diseñar nuevos conceptos o la utilización de nueva tecnología para que puedan ser modulares. Al obtener los resultados de agrupación se realizaron diferentes cuatro propuestas para la minimización de piezas en la caja de baterías de 30".

6.4. Diseños propuestos.

En la figura 6.3 se muestra el modelo propuesto 1 donde se hizo una reducción al unir los soportes laterales con el canal y se minimizaron piezas de 100% a 69% de partes.

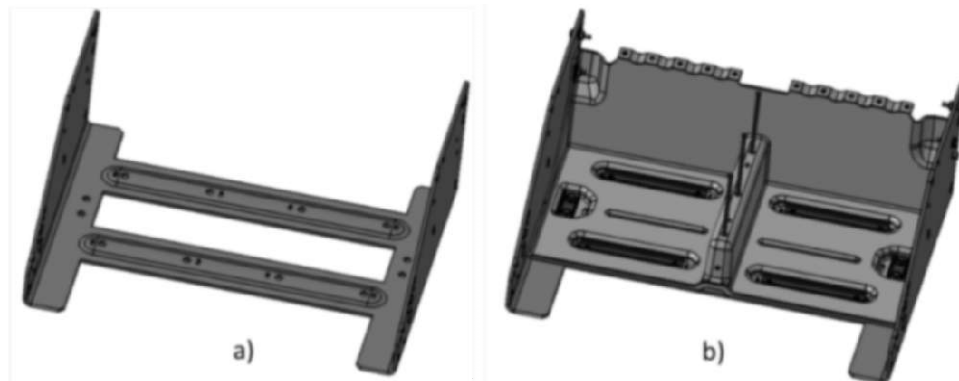


Figura 6.3. Modelo propuesto 1: a) Union de soporte lateral y canal, b) modelo completo.

En la figura 6.4 y 6.5 se muestra el modelo propuesto 2 y 3 donde se hizo una reducción al unir los soportes laterales izquierdo y derecho con el canal y se eliminaron los soportes laterales se minimizo de un 100% a un 56% de partes.

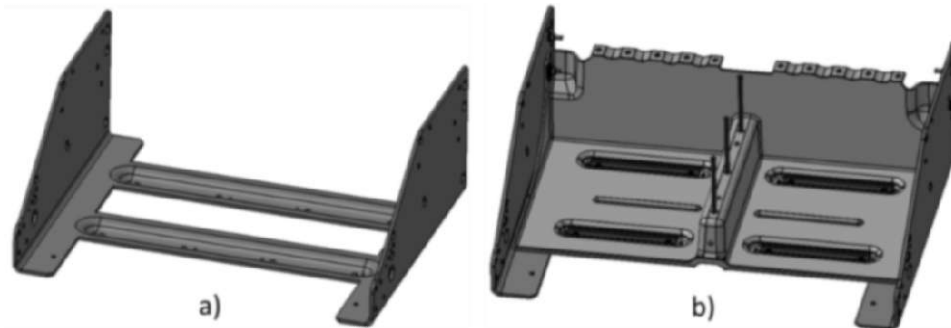


Figura 6.4. Modelo propuesto 2: a) Unión de soporte lateral y canal, b) modelo completo.

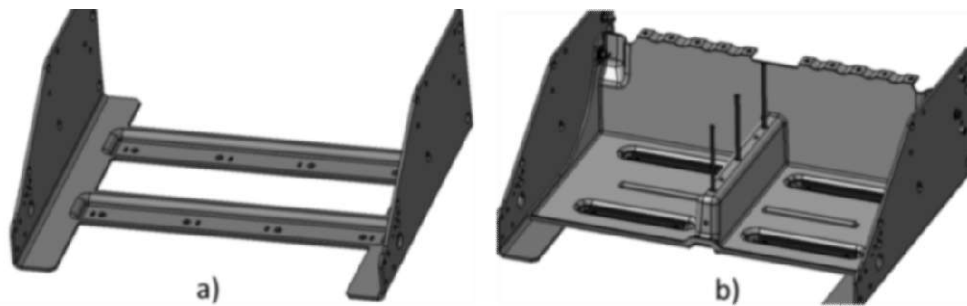


Figura 6.5. Modelo propuesto 3: a) Unión de soporte lateral y canal, b) modelo completo.

El diseño propuesto 4, se reducen los componentes de un 100 % a 54% de partes. En este diseño se realizó la unión del canal y los soportes laterales izquierdo y derecho, colocando en los soportes refuerzos para la unión con la bandeja, lo cual estaría reduciendo parte de la tornillería, en la bandeja se eliminaron los soportes bandeja al tanque de aire y parte de la tornillería, se diseñaron las entradas para el refuerzo como se muestra en la figura 6.6.

En la Figura 6.7, se muestra el diseño completo el cual fue considerado para realizar el análisis por elemento finito, el cual se eligió debido a que fue el que tuvo más reducción de partes debido a que las propuestas 1, 2 y 3 no cumplían con el diseño requerido y al realizarlas se tendría una pérdida de materia por el diseño realizado.

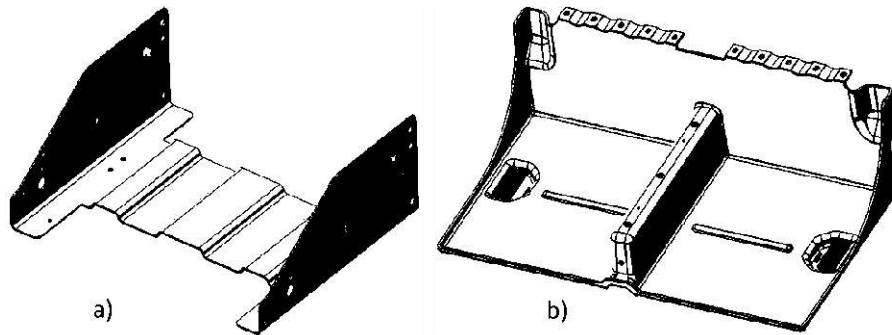


Figura 6.6.Diseño propuesto a) Canal y soportes laterales izquierdo y derecho, b) Bandeja con modificaciones.

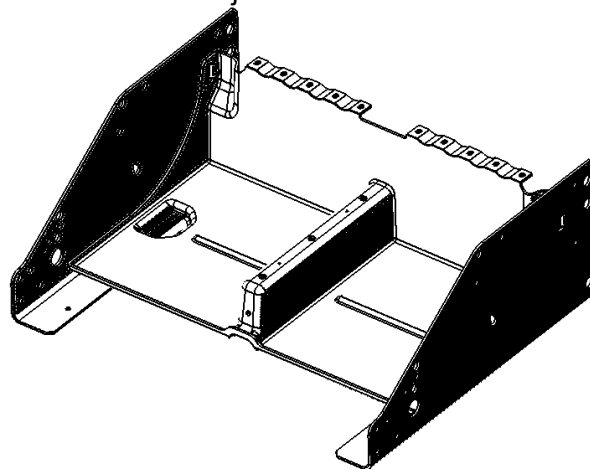


Figura 6.7.Diseño propuesto.

6.5. Análisis por elemento finito modelo original.

Con la finalidad de analizar y comparar el comportamiento de los esfuerzos se realizaron análisis de elemento finito a la caja de baterías original utilizada actualmente por NAVISTAR.

Una vez aplicadas las cargas mencionadas en el capítulo 5 se obtuvieron los resultados de esfuerzos bajo el criterio de falla von Mises, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 6.3 se concentran los resultados obtenidos para cada caso de estudio de carga de aceleración.

Tabla 6.3.Esfuerzos von Mises modelo original.

Caso de carga Modelo original	Esfuerzos von Mises	
	4 baterías	3 baterías
Vertical	9.66%	5.08%
Lateral	12.60%	10.54%
Longitudinal	14.83%	13.60%

En la figura 6.8 se muestra la distribución de esfuerzos para el modelo completo original con 4 baterías para el caso de aceleración vertical, en la figura 6.9 se muestra el canal ya que es el componente donde se encuentra el mayor esfuerzo en una pequeña zona con una resistencia de 9.66%.

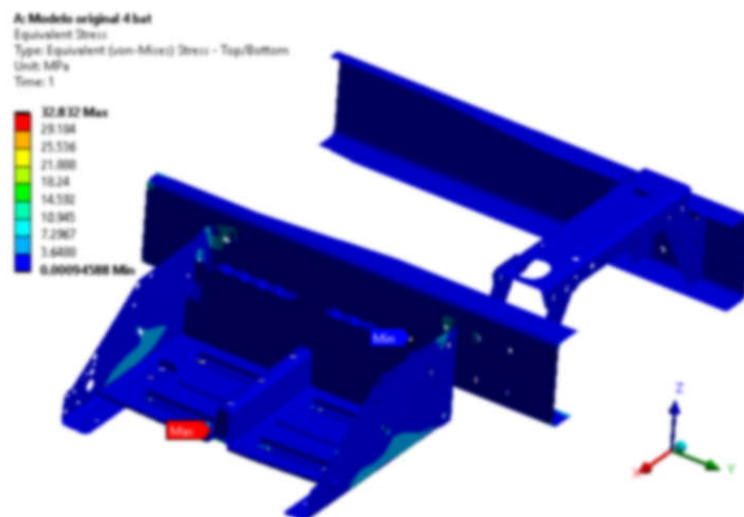


Figura 6.8. Distribución de esfuerzos modelo original, aceleración vertical.

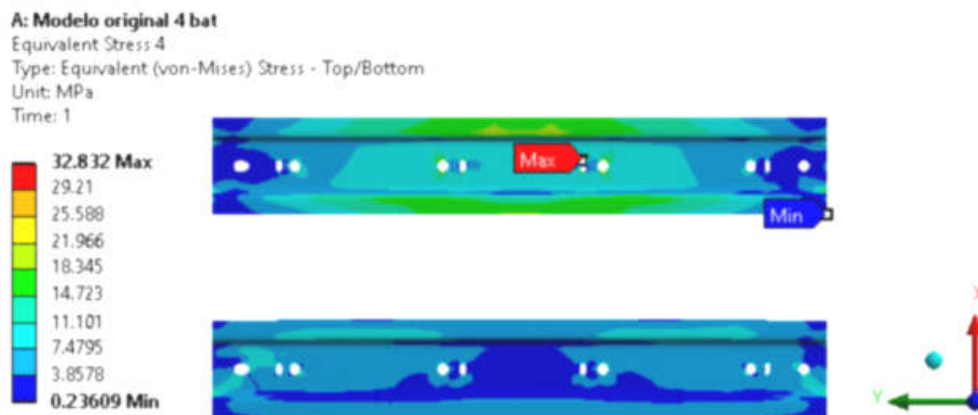


Figura 6.9.Distribucion de esfuerzos en canal de modelo original.

Al obtener la distribución de esfuerzos de von Mises del modelo original y al tener el esfuerzo de los materiales aplicados, se calculó el factor de seguridad con la ecuación (6.1), los resultados se muestran en la tabla 6.4, para el caso

de 3 y 4 baterías, donde se observa que los componentes cumplen con el factor de seguridad.

$$f_s = \frac{\sigma_y}{\sigma_{max}} \quad (6.1)$$

Tabla 6.4. Factores de seguridad modelo original.

Componente	Tensile Yield Strength (MPa)	4 baterías		3 baterías	
		Esfuerzos von Mises	Factor de seguridad	Esfuerzos von Mises	Factor de seguridad
Bandeja	87	2.30%	43.47	2.38%	42.01
Soporte lateral	296	0.78%	128.20	0.51%	197.33
Soporte lateral izquierda y derecha	340	3.20%	31.22	2.56%	39.08
Soporte inferior	340	1.02%	97.70	0.97%	102.71
Larguero	550	3.17%	31.50	2.89%	34.63
Brackets	340	3.24%	30.88	2.95%	33.93
Travesaño	550	0.88%	113.16	0.87%	115.30
Canal	340	9.66%	10.35	5.08%	19.27
Soporte de tanque	296	3.15%	31.72	1.90%	52.666

En la figura 6.10, se muestra la distribución de desplazamiento en el modelo original con un valor mínimo, el cual se encuentra en la bandeja.

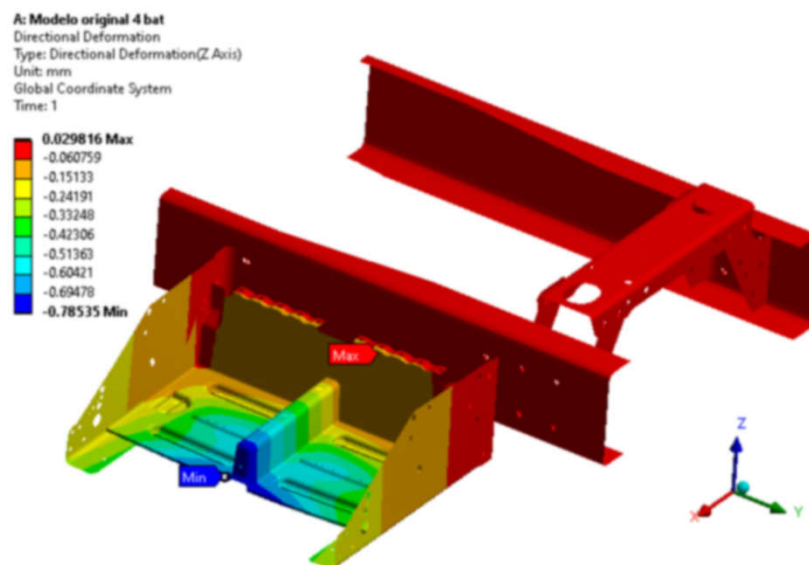


Figura 6.10. Distribución de desplazamientos modelo original.

6.6. Análisis por elemento finito modelo propuesto.

Una vez obtenido resultado del modelo propuesto con la reducción de piezas se aplicaron las condiciones frontera y cargas como se mencionan en la sección 5.4.5.1 a continuación, se muestran los resultados obtenidos en los análisis de elemento finito para la determinación de la distribución de los esfuerzos. En la tabla 6.5 se concentran los resultados obtenidos para cada caso de estudio de carga de aceleración.

Tabla 6.5. Esfuerzos von Mises modelo propuesto.

Caso de carga Modelo original	Esfuerzos (MPa) von Mises	
	4 baterías	3 baterías
Vertical	8.35%	6.25%
Lateral	13.33%	11.21%
Longitudinal	27.48%	25.82%

En la figura 6.11 se observa la distribución de esfuerzos para el modelo completo propuesto con 4 baterías para el caso de aceleración vertical.

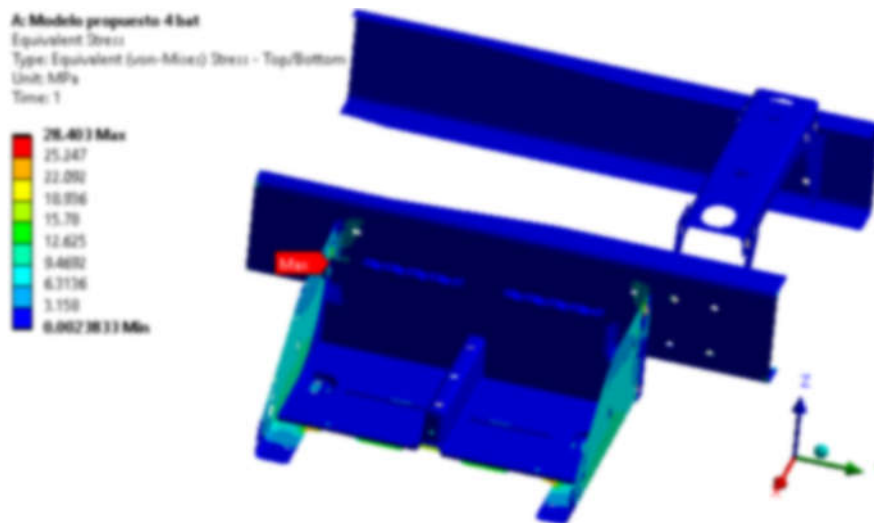


Figura 6.11. Distribución de esfuerzos de modelo propuesto, aceleración vertical.

El componente rediseñado, es en el cual se encuentra el mayor esfuerzo, en una pequeña zona con una resistencia 8.35%, como se observa en la figura 6.12.

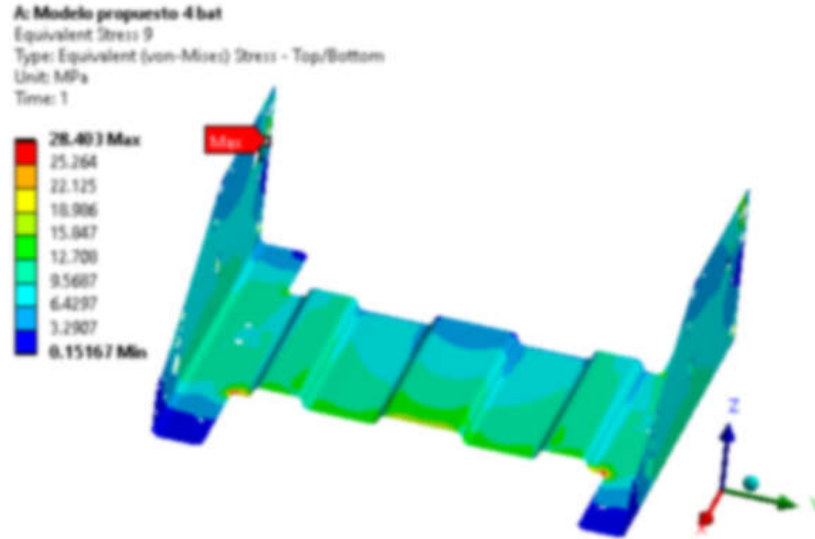


Figura 6.12.Distribucion de esfuerzos en componente rediseñado.

Al obtener la distribución de esfuerzos de von Mises del modelo propuesto y al tener el esfuerzo de los materiales aplicados, se calculó el factor de seguridad con la ecuación (6.1), los resultados se muestran en la tabla 6.5, para el caso de 3 y 4 baterías, donde se observa que los componentes cumplen con el factor de seguridad.

Tabla 6.6.Factor de seguridad modelo propuesto.

Componente	Tensile Yield Strength (MPa)	4 baterías		3 baterías	
		Esfuerzos von Mises	Factor de seguridad	Esfuerzos von Mises	Factor de seguridad
Bandeja	87	8.56%	11.68	6.91%	14.47
Soporte lateral	296	2.42%	41.32	1.07%	93.45
Soporte lateral izquierda y derecha	340	8.35%	11.97	5.04%	19.85
Soporte inferior	340	0.95%	105.26	0.76%	131.57
Larguero	550	2.44%	40.98	3.87%	25.83
Brackets	340	3.16%	31.68	4.10%	24.39
Travesaño	550	0.69%	144.92	1.07%	93.45

En la figura 6.13, se muestra la distribución de desplazamiento en el modelo propuesto con un valor mínimo, el cual se encuentra en la bandeja.

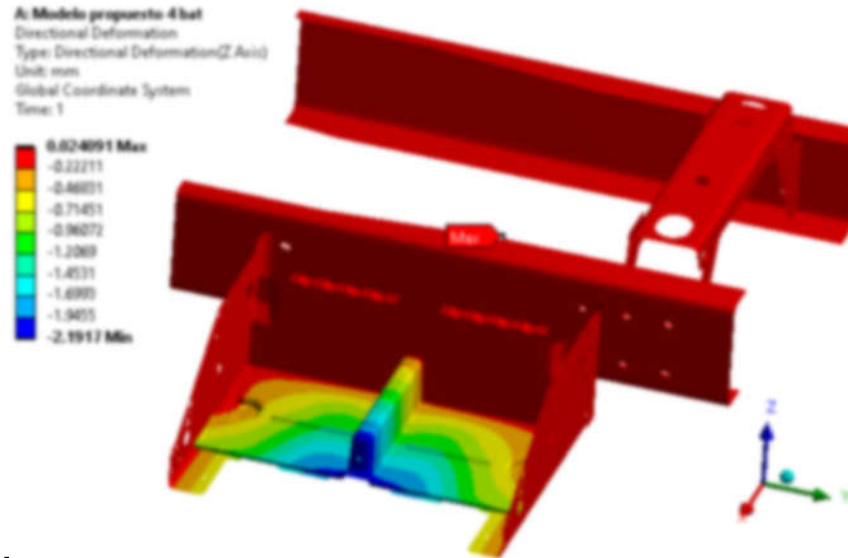


Figura 6.13.Distribucion de desplazamientos modelo propuesto.

Al obtener la distribución de los esfuerzos del modelo original, estos resultados se usaron para realizar una comparación con resultados de la distribución de esfuerzos del modelo propuesto los cuales demuestran que el modelo propuesto está bajo los mismo parámetros del modelo original.

6.7. Análisis modal

Una vez aplicadas las condiciones mencionadas en la sección 5.4.6, para el análisis modal, los resultados de los modos del modelo original para los casos de 3 y 4 baterías son mostrados en la tabla 6.5. En la figura 6.10 se muestra el análisis modal para el modelo original con 4 baterías en una deformación dirección Z para el modo 1 con una frecuencia de 186.64%.

Tabla 6.7.Modos modelo original.

Modos modelo original		
Modo	4 baterías	3 baterías
	Frecuencia	Frecuencia
1	186.34%	186.52%
2	255.94%	255.82%
3	361.82%	363.64%

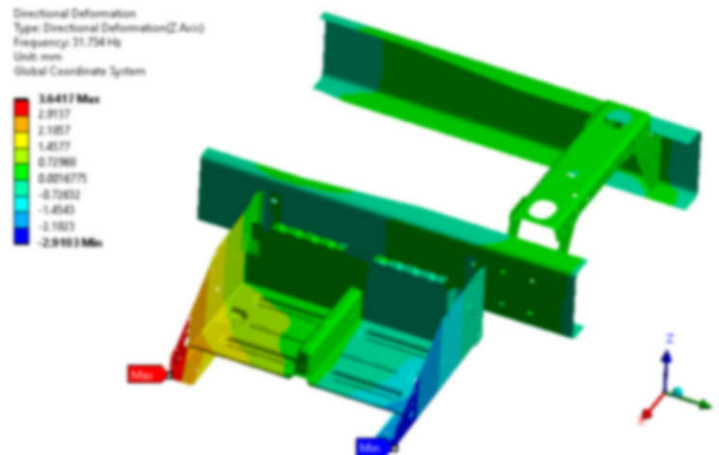


Figura6.14.Análisis modal modelo original.

Los resultados de los modos del modelo propuesto para los casos de 3 y 4 baterías son mostrados en la tabla 6.6. En la figura 6.11se muestra el análisis modal para el modelo propuesto con 4 baterías en una deformación dirección Z para el modo 1 con una frecuencia de 148.58% Hz.

Tabla 6.8.Modos modelo propuesto.

Modos modelo propuesto		
Modo	4 baterías	3 baterías
	Frecuencia	Frecuencia
1	148.58 %	148.88 %
2	246.35 %	246.47 %
3	303.94 %	303.76 %

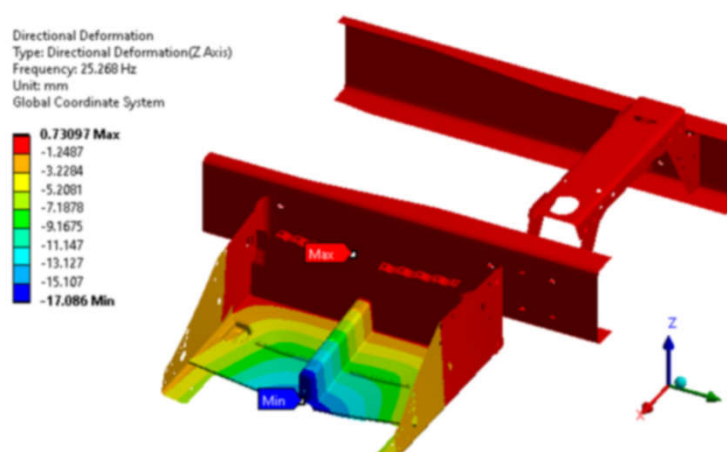


Figura6.15.Análisis modal modelo propuesto

Al obtener los resultado del análisis modal se puro realizar una comparación de ambos modelos, donde se observó que la frecuencia natural es mayor a lo requerido y esto nos demuestra que tanto la caja de batería original y propuesta no tendrá un riego de aumento de vibraciones.

6.8. Discusión general

Al haber aplicado el análisis de la metodología FAS en la caja de baterías, se generan los distintos procesos de análisis e interpretación, nos permite entender los resultados de agrupación realizados por el algoritmo, en el que se muestra que los bloques resultantes cumplen con las funciones comunes, lo cual ayuda desarrollar un sistema modular con los componentes de la caja de baterías para poder reducir la complejidad del sistema.

Al conocer la relación entre los componentes, se pudo identificar los módulos y una reducción de partes, para poder proponer un diseño de la caja de baterías, al realizar el análisis de elemento finito, en los resultado se pudo observar que el esfuerzo máximo del modelo original fue 15% mayor que el modelo propuesto, en el cual el modelo original tenía un peso menor al modelo propuesto, lo cual se pudo demostrar que el modelo propuesto es funcional ya que cumple con el análisis estructural y con el factor de seguridad del modelo original y el análisis modal del modelo propuesto no aumentaría las vibraciones de la caja de baterías al ser sometida a las diferentes cargas.

Al generar el rediseño de la caja de baterías se podría generar una reducción en tiempos de fabricación y una mejor eficiencia de producción, una mayor factibilidad de reducción de partes.

Capítulo 7

Conclusiones y recomendaciones.

7.1. Conclusiones

Fue posible aplicar una metodología de reducción de partes en la caja de baterías y se pudo realizar un rediseño en la caja seleccionada para poder aplicar una análisis estructural.

Se logró realizar una reducción de 100% a 54% de partes entre el diseño original y el propuesto de la caja de baterías utilizando la metodología FAS.

Se demostró las relaciones que existen entre los distintos componentes y subsistemas y que el algoritmo de clúster funciona para encontrar los grupos de individuos que interactúan entre sí y pueden ser seleccionados para formar módulos y es adecuado para la reducción de parte de este tipo de componentes.

Se realizó la comparación de resultado se observó que el modelo propuesto es funcional debido a que la distribución de esfuerzos es menor a un 15% y una distribución de desplazamientos de un 18% al modelo original y cumple con los parámetros requeridos.

Para el análisis modal del modelo original y propuesto, cumplen con la frecuencia natural de ser mayor a 17 Hz, por lo cual son estructuralmente adecuados y no estará en riesgo de un aumento de vibración con los demás componentes del camión.

7.2. Recomendaciones.

Para una validación total y satisfactoria del modelo propuesto de la caja baterías, se recomienda realizar un análisis de elemento finito, donde se incluyan los sujetadores de baterías, tornillos, bloques de baterías en sólido estableciendo contactos entre componentes como se muestra en la figura 7.1 y asignar una precarga en ellos para tener un resultado más preciso.

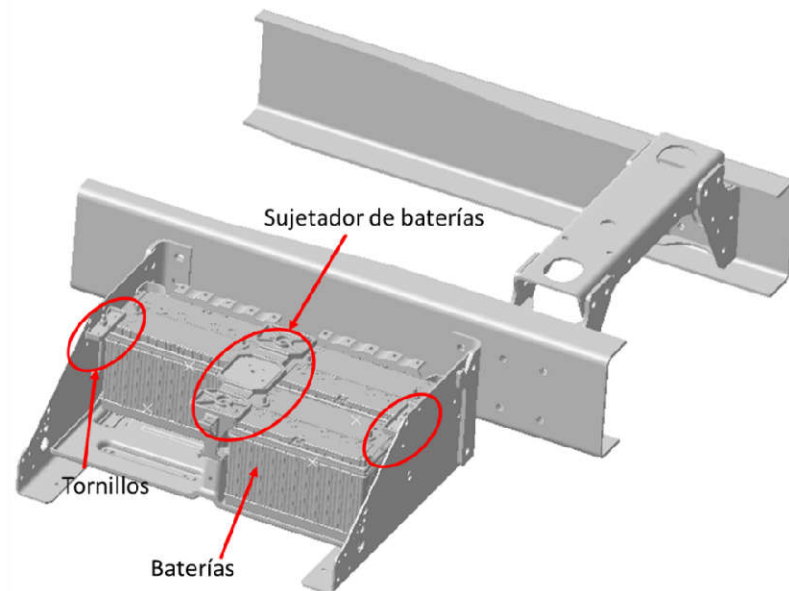


Figura 7.1. Validación para modelo propuesto.

La metodología estudiada en este trabajo de investigación puede ser aplicada al proceso de desarrollo de nuevos productos en NAVISTAR, lo cual permitiría la integración de componentes que permitan ofrecer más modelos que puedan cubrir en mayor medida las necesidades requeridas.

Como un trabajo a futuro se podría realizar un estudio similar al presentado en los diferentes modelos de cajas de baterías y sistemas que componen el camión, y así generar una reducción de partes y componentes.

8. Referencias

- [1] Blanca de la Peña Herrador, Francisco Aguayo González, Juan Ramón Lama Ruiz y Nicolás del Pozo Madroñal (2010) “Diseño de plataformas modulares para productos”, Técnica Industrial 286, PP 44-51
- [2] R. Nurcahyo and A. D. Wibowo, (2015) “Manufacturing Capability, Manufacturing Strategy and Performance of Indonesia Automotive Component Manufacturer,” Procedia CIRP, vol. 26, pp. 653–657.
- [3] Ali K. Kamrani, Ph.D. Sa'ed M. Salhie, Ph.D. (2002), Product Design For Modularity, Springer Science Business Media, LLC, second edicion. pp 45.
- [4] G.Q. Huang (1996) Design for X Concurrent engineering imperatives, Springer-Science Business Media, B.V., primer edition. Pp 356
- [5] Anil Mital, Anoop Desai, Anand Subramanian, AashiMital (2008), Product Development a Structured Approach to Consumer Product, Development, Design, and Manufacture, Second Edition, El Servier, pp 159-200.
- [6] Boothroy, G. and Dewhurst (2002). Product Design for Manufacturing and Assembly. CRC Press Taylor, New York.
- [7] George E. Dieter, Linda C. Schmidt (2013), Engineering design., Fifth edition. McGraw-Hill Companies
- [8] Hernández Bernabé, (1999), Diseño de nuevos productos, valencia: servicios de publicaciones pp 21
- [9] Pahl, G and W.Beitz,(2013), Engineering design: a systematic approach, springer science & Business Media.
- [10] Hölttä K, Tang V, Seering WP, (2003), Modularizing Product Architectures Using Dendrograms. 14th International ConferenceonEngineering.

- [11] Torres, B.M., (2019), Diseño mecatrónico para la instalación de equipos de grandes dimensiones. Aplicaciones de la metodología DFL a una planta solar, Universidad de Oviedo.
- [12] Frandsen, T., (2017), Evolution of modularity literature: a 25-year bibliometric analysis. International Journal of Operation & Production Management.
- [13] New, P.J., B Bras, and D.W. Rosen., (1998), Implications of modularity on product design for the life cycle.
- [14] Sérgio Faria, (2018), cajas de batería de coches eléctricos, de gestamp, innovación made in spain, Electric Vehicle - BatteryTray Leader.
- [15] Mrs. JostnaIngale, Prof. A. B. Dighewar (2017) " Design and Optimization of Car Battery Tray" International Journal of Research in Advent Technology, Vol.5, No.2, pp 58-62.
- [16] Cengiz Yildiz et.al. (2014) Interactive Design of a truck battery box with material selection to improve quality, 8th International Quality Conference Center for Quality, Faculty of Engineering, University of Kragujevac.
- [17] Na Yang, Rui Fang, Hongliang y Hui Xie¹, (2019) Dynamic and static analysis of the battery box structure of an electric vehicle, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- [18] Blees, C., (2011), Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien“, Ph.D. thesis, Technical University Hamburg-Harburg, pp. 10-25,
- [19] Muffatto, M., & Roveda, M. (2002). Product Architecture and Platforms: A Conceptual Framework. International Journal of Technology Management.
- [20] Dahmus, J. B., González-Zugasti, J. P., & Otto, K. N. (2001). Modular product architecture Elsevier. Pp 409–424.

[21] Yang, T. G., Beiter, K. A., & Ishii, K. (2005). Product Platform Development: Considering Product Maturity and Morphology. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition pp 11.

[22] Mrs. JostnaIngale, Prof. A. B. Dighewar (2017), Design and Optimization of Car Battery Tray, International Journal of Research in Advent Technology, Vol.5, No.2, pp 58-62.

[23] Cunha, C., Agard, B., &Kusiak, A. (2007). Design for Cost: Module-Based Mas Customization. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 4(3), 10.

[24] Sosa, M. E., Eppinger, S. D., & Rowles, C. M. (2007). A Network Approach to define, Modularity of Components in Complex Products. ASME, 129, 1119.

[25] Piller, F., Kumar, A., (2010) “Mass customization - providing custom products and services with mass production efficiency”, The capco institute Journal of financial transformation, p. 128.

[26] Scania Sverige AB (2018), Scania. Obtenido de <https://www.scania.com/se/sv/home.html>

[27] Scania CV AB (2019), Scania, obtenido de <https://www.scania.com/group/en/the-model-for-success/>

[28] Ulrich Weidemann (2017) “MontageclusterzurStrukturierungderFahrzeugendmontage – EineMethodezurfrühzeitigenPlanungundAuslegungvonEndmontagelinien”, Tesis de doctorado, TechnischenFakultätderUniversität des Saarlandes.

[29] Antonio Guzmán (2019), Revistadelmotorobtenido de <https://www.revistadelmotor.es/2012/02/01/la-plataforma-mqb-de-volkswagen-investigacion-en-curso-xiv.html>

[30]E-ForceOne AG, (2020), obtenido de <https://www.eforce.ch/products/ef26>

[31] Manual Ansys (2016), Introduction to ANSYS Mechanical, 17.0 Release.

[32] Schuh. G et al., (204), Design principles for an integrated product and process development approach for rotationally symmetric products in proceedings of PICMENT 14 conference:Portland International Center for Management of Engineering and Technology; infrastructure and Service Integration.

[33] Maraghy, H. and T. AlGeddwy,(2012), New dependency model and biological analogy for integrating product desing for variety with market requirements. Journal of Engineering Design p 722-745.

[34] Jose, A. and M. (2015),Tollenaere Modular and platform methods for product family design: literature analysis Journal of intelligent manufacturing,p.371-390.

[35] Zhang, W., S. Tor, and G. Britton, (2006), Managing modularity in product family design with functional modeling. The international Journal of Advanced Manufacturing Technology, pp 579-588.

[36] Lange, M.W. and A., (2014), imsdahl, Modular Fuction deployment: using module drivers to impart strategies to a product architure, in Advances in product family and product platform design 2014 springer. P91-118.

[37] Hause, J.R. and D., (1998), Clausing, the house of quality.

[38] Echevarría–Quintana., M. (2015). Metodología de diseño conceptual modular. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).Tesis Doctorado, 62-64.

[39] Sosa, M. E. (2008). A strucured approach to predicting and managing technical interactions in software development. Research in Engineering Design, 19, 47-70.

- [40] Brusoni, S., &Prencipe, A. (2005). Making Design Rules: A Multi-Domain Perspective.
- [41] Yu, T.-L., Yassine, A. A., & Goldberg, D. E. (2007). An information theoretic method for developing modular architectures using genetic algorithms. Research in EngineeringDesign - Springer, 91-109.
- [42] Smaling, R., &Weck, O. d. (2006). Assesing Risk and Opportunities of Technology Infusion in System Design. Published online in Wiley InterScience, PP 1-25
- [43] Steven D. Eppinger and Tyson R. Browning., (2012), Design structure matrix methods and applications, Massachusetts Institute of Technology. PP 4-10
- [44] Browning, T.R., (2015), Design structure matrix extensions and innovations: a survey and new opportunities, IEEE Transactions on Engineering Management, PP 27-52
- [45]DesignStructure Matrix (DSM), (2010), obtenido de www.dsmweb.org
- [46] Echevarria Quintana, M. (2009). FAS Methodology. 2009 IEEE the 10th International Conference on Computer-aided Industrial Design & Conceptual Design. PP 2309-2312.
- [47] Pinillos, R. (2011). Platform Proyect Management: Optimizing Product Development by Actively Managing Commonality. The newsletter of the Massachutts Institute of Technology.
- [48] A Hrenikoff., (1941), Solution of problems in elasticity by the framework method. J. Appl. Mech, pp 169-75

[49] D McHenry, (1943), A lattice analogy for the solution of plane stress problems. J. Inst. Civ. Eng., pp 59-82

[50] NM Newmark, (1949), Numerical Methods of Analysis in Engineering. In: LE Grinter (ed.). Macmillan, New York.

[51]G Kron (1944), Tensorial analysis and equivalent circuits of elastic structures. J. Franklin Inst, pp. 399-442.

[52] G Kron. Equivalent circuits of the elastic field. J. Appl. Mech. 1944; **66**, A149-A161.

[53] J Turner, RW Clough, HC Martin and LC Topp (1956), Stiffness and deflection analysis of complex structures. J. Aeronaut. Sci.

[54] RW Clough (1960), The finite element method in plane stress analysis. In: Proceedings of the 2nd ASCE Conference on Electronic Computation, Pittsburgh.

[55] Vishal JAGOTA, Aman Preet Singh SETHI and Khushmeet KUMAR (2013) Finite Element Method: An Overview, Walailak J Sci & Tech.

[56] C Zienkiewicz and YK Cheung, (1965). Finite elements in the solution of field problems. Engineer.; **220**, 507-10.

[57] D. L. Logan, D. L. Logan, E. Veitch, C. Carson, K. R. Burrell, V. Gould, and E. Wagner, (2007), A First Course in the Finite Element Method Fourth Edition, 4
ta. USA: Thomson.

[58] P. Seshu, (2012), Textbook of Finite Element Analysis, 10 ma. Nueva Dheli, India: PHI LearningPrivateLimited.

[59] José Miguel Vargas Félix, (2010), “Cálculo de Estructuras Utilizando Elemento Finito con Cómputo en Paralelo”, Centro de Investigación en Matemáticas A.C.

[60] E. Madenci and I. Guven, (2015), The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS, 2 da. USA: Springer

[61] Zu-Qing Qu, (2004), Model Order Reduction Techniques with Applications in Finite Element Analysis, Springer.

Anexo I

Para la definición de la ecuación 4.19, es mostrada a continuación:

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad (1)$$

y establecer el lado derecho de la ecuación (4.13) igual a cero, se obtiene:

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0 \quad (2)$$

donde ω es la frecuencia circular natural de la vibración libre de la masa, expresada en unidades de radianes por segundo o revoluciones por minuto (rpm). Por lo tanto, la frecuencia circular natural define el número de ciclos por unidad de tiempo de la vibración de la masa. En la ecuación (4.20) se observa que ω depende sólo de la rigidez del resorte k y de la masa m del cuerpo.

Anexo 2

Para el desarrollo de la ecuación 4.23, Sustituyendo las ecuaciones (4.21) y (4.22) en la ecuación (4.20) se obtiene:

$$-[M]\omega^2\{d'\}e^{i\omega t} + [K]\{d'\}e^{i\omega t} = 0 \quad (3)$$

Combinando términos en la ecuación (4.25), se obtiene:

$$e^{i\omega t}([K] - \omega^2[M])\{d'\} = 0 \quad (4)$$

Debido a $e^{i\omega t}$ no es cero, a partir de la ecuación (4.26) se obtiene:

$$([K] - \omega^2[M])\{d'\} = 0 \quad (5)$$

La ecuación (4.27) es un conjunto de ecuaciones lineales homogéneas en términos del modo de desplazamiento $\{d'\}$. Por lo tanto, la ecuación (4.27) tiene una solución no trivial si y solo si el determinante de la matriz de coeficiente de $\{d'\}$ es cero; es decir, se debe tener:

$$([K] - \omega^2[M]) = 0 \quad (6)$$

Donde la matriz global M y la matriz de rigidez global K se ensamblan a partir de las correspondientes matrices de elementos mediante el procedimiento habitual de ensamblaje. Este sistema de ecuaciones se satisface con una solución armónica de la siguiente forma [61]:

$$d = \phi \cos \omega t \quad (7)$$

Donde ϕ y ω son parámetros de modo y la frecuencia natural. Sustituyendo la ecuación (4.29) en la ecuación diferencial (4.22), se obtiene:

$$-M\phi\omega^2 \cos \omega t + K\phi \cos \omega t = 0 \quad (8)$$

Reordenando los términos, se obtiene lo que se conoce como el problema del valor característico:

$$K\phi = \lambda M\phi \quad (9)$$

Resumen autobiográfico

Aurora Yamilet Hernández Hernández, nació el 18 de febrero de 1994, obtiene el título de Ingeniero Mecatrónico en 2016 en la Universidad Autónoma de Nuevo León, posteriormente estudio una Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz, por la misma institución en el cual se le permitió desarrollar su proyecto de tesis con la empresa NAVISTAR, su área de interés es en simulaciones numéricas de procesos, ha colaborado en diferentes proyectos de investigación, además, ha participado en diferentes congresos nacionales e internacionales.